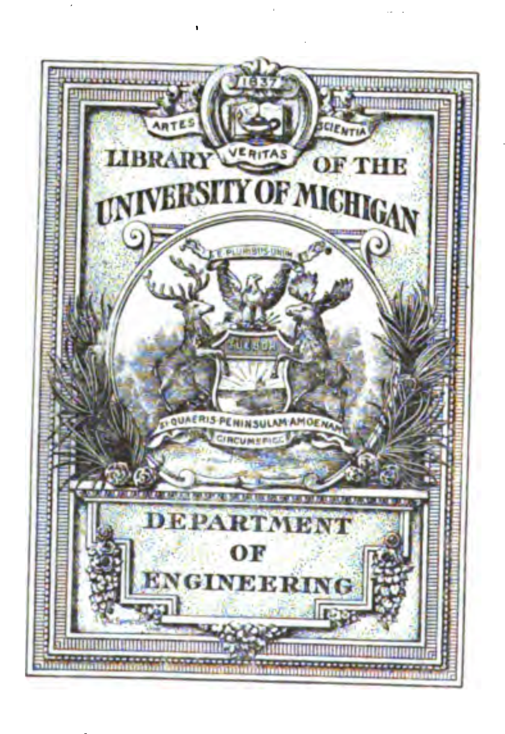

1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING

RECHERCHES

THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES

SUR LES

OSCILLATIONS DE L'EAU

ET LES

MACHINES HYDRAULIQUES

A COLONNES LIQUIDES OSCILLANTES

AVEC HUIT PLANCHES

SECONDE PARTIE

ÉCLUSES DE NAVIGATION, MOTEURS HYDRAULIQUES, MACHINES ÉLÉVATOIRES
MACHINES D'ÉPUISEMENT
MACHINES SOUFFLANTES ET A COMPRIMER L'AIR, POMPES, ETC.

PAR

LE Mis ANATOLE DE CALIGNY
CORRESPONDANT DE L'INSTITUT DE FRANCE
Académie des Sciences

PARIS
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE DE J. BAUDRY, ÉDITEUR
15, rue des Saints-Pères, 15.
Et à LIÈGE. 19, rue Lambert-Lebègue.

1883

RECHERCHES
THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES
SUR LES
OSCILLATIONS DE L'EAU
ET LES
MACHINES HYDRAULIQUES
A COLONNES LIQUIDES OSCILLANTES
AVEC HUIT PLANCHES

SECONDE PARTIE

ÉCLUSES DE NAVIGATION, MOTEURS HYDRAULIQUES, MACHINES ÉLÉVATOIRES
MACHINES D'ÉPUISEMENT
MACHINES SOUFFLANTES ET A COMPRIMER L'AIR, POMPES, ETC.

PAR

LE M[is] ANATOLE DE CALIGNY
CORRESPONDANT DE L'INSTITUT DE FRANCE
Académie des Sciences

PARIS
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE DE J. BAUDRY, ÉDITEUR
15, rue des Saints-Pères, 15
Et à LIÈGE. 19, rue Lambert-Lebègue.

—

1883

AVERTISSEMENT DE LA SECONDE PARTIE

La première partie de cet ouvrage était imprimée en août 1880. C'est en quelque sorte une seconde édition de mémoires que j'avais déjà publiés, sauf quelques expériences inédites, et diverses considérations relatives surtout aux phénomènes de succion de l'eau en mouvement. Depuis cette époque j'ai eu occasion de faire dans l'arsenal du port de Cherbourg, des expériences sur les ondes et sur le mouvement de l'eau dans les tuyaux coudés. Leur place aurait été dans la première partie, si elles avaient été faites avant l'impression de celle-ci. On les trouvera pages 535 à 552 et pages 901 à 916.

Quant à la seconde partie de cet ouvrage, il a été nécessaire de la rédiger de nouveau presque en entier. Elle contient beaucoup de choses inédites. Elle commence par un mémoire de 216 pages sur mon système d'écluses de navigation, qui était imprimé en juillet 1881. Depuis cette époque, j'ai trouvé des moyens d'obtenir une marche entièrement automatique de ce système, *sans bassin d'épargne, ni soupape, ni cataracte.* On en trouvera la description à la fin de l'ouvrage, pages 541 et suivantes. Je dois dire que si j'avais fait plus tôt cette modification essentielle, j'aurais pu ne pas donner autant de développements à quelques détails, quoiqu'il soit d'ailleurs intéressant d'en conserver la trace.

Un autre fascicule, qui était imprimé en juillet 1882, renferme la description et la théorie de divers systèmes de machines hydrauliques à colonnes liquides oscillantes automatiques, les unes motrices, les autres élévatoires ou à faire des épuisements, divers systèmes de pompes reposant sur des principes analogues, et des appareils à compression d'air.

Le dernier fascicule renferme des expériences précitées sur les ondes, des recherches sur des roues hydrauliques à colonnes liquides oscillantes, un mémoire sur la marche automatique de l'écluse de l'Aubois, et des expériences sur une application récente de mon appareil élévatoire automoteur à tube oscillant.

Je me proposais d'entrer dans plus de détails quant à mes recherches sur les ondes, mais je publierai sur ce sujet un travail spécial, ayant occasion de faire des expériences sur une très grande échelle.

Dans cet ouvrage je me suis souvent servi des termes depuis longtemps usités de *perte de force vive*. Il est à peine nécessaire de rappeler que, m'étant occupé moi-même de considérations relatives à la nouvelle théorie de la chaleur, (voir p. 368 et suivantes de la première partie), je n'emploie pas ces expressions dans le sens absolu qu'elles avaient autrefois, connaissant la manière dont on admet aujourd'hui la transformation de la force vive en chaleur.

La premiere partie contient les principes et les expériences qu'il est essentiel de connaître pour bien comprendre la seconde.

Versailles, 18, rue de l'Orangerie. — 2 juin 1883.

EXPÉRIENCES ET CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

SUR UN

NOUVEAU SYSTÈME D'ÉCLUSES

DE NAVIGATION

Dans cette seconde partie, je ne suivrai pas l'ordre des dates des inventions diverses qui y sont décrites. Je commencerai par mes recherches sur les écluses de navigation parce qu'on s'occupe en ce moment de les appliquer sur une très grande échelle.

Je vais d'abord reproduire, avec quelques modifications, un mémoire publié, en 1867, dans *le Journal de Mathématique* de M. Liouville. Une planche a été jointe à ce mémoire dans *la Revue universelle* de M. de Cuyper, année 1869. Des tableaux d'expériences, qui devaient y être ajoutés dans des recueils spéciaux, ont été perdus à Versailles où mon appartement a été occupé pendant les évènements de 1870-1871, ils avaient été conservés longtemps par une Commission d'inspecteurs généraux des ponts et chaussées. On trouvera dans ce mémoire un extrait officiel de leur rapport daté du 22 mai 1866.

Je donnerai ensuite quelques détails sur les expériences faites, beaucoup plus en grand, à l'écluse de l'Aubois, dépendant du canal latéral à la Loire. Mais il m'a semblé utile de

conserver les résultats publiés dans ce mémoire déjà ancien, parce qu'il n'a pas toujours été possible, à cette écluse, de se servir de mesures aussi rigoureuses. On a, d'ailleurs, employé à celle-ci des moyens satisfaisants pour se rendre compte des effets, ainsi que cela est expliqué dans un rapport fait à l'Académie des Sciences, le 18 janvier 1869, par MM. Combes, Phillips, de Saint-Venant, rapporteur, et dans un rapport fait au Ministère des travaux publics par M. Vallès, inspecteur général des ponts et chaussées, dont un extrait de 56 pages, avec planche détaillée, est inséré dans *les Annales des ponts et chaussées* (Cahier de septembre 1880). Je donnerai ultérieurement divers extraits de ces documents officiels, c'est d'ailleurs à l'écluse de l'Aubois qu'on a pour la première fois disposé un ajutage divergent, afin de diminuer la perte de force vive à l'entrée de l'eau dans le sas, ce qui change l'état de la question.

Principes du système.

Cet appareil a pour objet de remplir un sas d'écluse de navigation, en tirant une partie de l'eau du bief inférieur, et de le vider en relevant une partie de l'eau au bief supérieur. Il se compose (planche VI) :

1° D'un grand tuyau de conduite fixe ABCDEF, débouchant par une extrémité dans l'enclave des portes d'aval de l'écluse GH et traversant par l'autre extrémité un réservoir R en communication avec le bief d'amont, et un réservoir R' qui est en communication avec le bief inférieur par le fossé de décharge IK dont la section sera la plus grande possible suivant les localités;

2° De deux tubes verticaux, ouverts à leurs extrémités, DC, EF, mobiles, et mettant alternativement le tuyau de conduite, percé de deux orifices horizontaux, en communication avec le bief d'amont par le réservoir R, et avec le bief

d'aval par le réservoir R'. Chacun de ces tubes mobiles est manœuvré à l'aide d'un balancier. On reviendra plus loin sur les détails relatifs à ces tubes : il ne s'agit d'abord que du principe.

Pour remplir l'écluse, on lève le tube vertical DC qui est dans le réservoir précité d'amont; l'eau s'écoule de ce réservoir dans l'écluse par le grand tuyau de conduite. Quand une certaine vitesse est acquise, on laisse ce tube vertical retomber sur son siège, de sorte que la communication est interrompue entre le grand tuyau de conduite et le bief d'amont. L'eau, en se dirigeant vers l'écluse, tend à baisser dans le grand tuyau de conduite; mais, quand elle est suffisamment descendue dans le premier tube vertical ouvert à ses deux extrémités, et dans lequel l'air extérieur entre librement par le sommet, on lève l'autre tube vertical EF pour établir la communication avec le bief d'aval, dont l'eau entre dans le tuyau de conduite pour remplir le vide que tend à y faire l'eau qui se dirige vers l'écluse en vertu du mouvement acquis. Quand ce mouvement s'est éteint, on baisse le tube mobile d'aval, on lève celui d'amont, et ainsi de suite, tant que l'appareil peut marcher assez utilement.

Pour vider l'écluse, il n'est nécessaire de manœuvrer qu'un seul des tubes mobiles, celui d'aval EF, l'autre pouvant rester baissé pendant toute l'opération de la vidange. On lève le tube mobile d'aval, l'eau de l'écluse s'écoule au bief inférieur par le grand tuyau de conduite. Quand une vitesse convenable est acquise dans ce dernier, on baisse ce tube EF. En vertu de la vitesse acquise, l'eau, après s'être élevée au niveau de celle qui est dans l'écluse, monte plus haut et se verse aux sommets des deux tubes mobiles; elle peut, à la rigueur, ne se verser que par le sommet du tube mobile d'amont, l'autre pouvant, si l'on veut, se prolonger assez haut pour que cet effet se produise de cette manière.

Dans les expériences en grand, faites à Chaillot, le tuyau de conduite ayant un mètre de diamètre intérieur, le versement se faisait par le sommet des deux tubes verticaux. Celui d'aval était entouré à son sommet d'un tuyau fixe, attaché au fond d'un réservoir supérieur en communication avec le bief d'amont. On conçoit qu'il peut se perdre de l'eau entre ce bout de tuyau fixe et le tuyau mobile d'aval; mais les extrémités de ces deux tubes sont disposées de manière que cette perte se réduise à très peu de chose, un rebord extérieur du tube mobile pouvant approcher de très près du sommet du tube fixe sans que cela empêche la fermeture du tube mobile sur un siège annulaire fixe, convenablement disposé au-dessous de celui-ci.

Les sections transversales n'étant jamais bouchées, des tuyaux de grand diamètre très fragiles, en très vieille tôle ou même en zinc, n'ont point été endommagés par le jeu d'immenses colonnes liquides.

Les orifices du grand tuyau de conduite sur lesquels les tuyaux mobiles verticaux viennent alternativement s'appuyer pour interrompre la communication du système, soit avec le bief d'amont, soit avec le bief d'aval, soit avec l'un et l'autre de ces biefs, doivent être disposés le plus près possible l'un de l'autre. La partie du tuyau de conduite sur laquelle ils se posent traverse une cloison M qui sépare les deux biefs, c'est-à-dire les réservoirs en communication avec l'un et l'autre de ces biefs, un des tubes verticaux étant en amont de cette cloison, et l'autre étant en aval. On conçoit donc qu'une cloison en fonte, du moins sur une certaine hauteur, vaut mieux qu'un mur pour la séparation dont il s'agit. Il est en effet facile de voir que plus il y aura de distance entre ces deux tubes mobiles, plus il y aura de force vive perdue dans la colonne comprise entre eux. Cependant il faut que le liquide ait autour de ces tuyaux l'espace libre nécessaire pour entrer ou sortir.

Je me suis occupé des moyens de faire marcher cet appa-

reil de lui-même, c'est-à-dire de manière que l'éclusier n'eût à intervenir que pour la mise en train. Mais je me suis aperçu que si le tuyau de conduite a une longueur développée assez grande, le nombre de périodes de l'appareil peut être tellement diminué, qu'une marche entièrement automatique serait sans importance.

Il résulterait d'ailleurs de la suppression des dispositions employées pour ce point secondaire, que l'éclusier aurait beaucoup moins d'efforts à faire pour manœuvrer les tubes verticaux mobiles, parce que le diamètre de ces derniers peut alors ne pas différer bien sensiblement de celui du grand tuyau de conduite, et même à la rigueur ne pas en différer du tout. J'ai montré, page 318, comment, en élargissant un tube vertical au-dessus d'un anneau inférieur de même diamètre que la conduite, on obtenait un mouvement automatique. J'ai exécuté une disposition semblable pour le tube mobile d'aval de ce système d'écluses pour la vidange, et j'ai obtenu ainsi une marche automatique d'une manière très simple dans les dernières périodes. Mais il en résulte que pour les premières périodes l'éclusier a plus de peine à lever ce tube, à cause de la pression de la colonne liquide verticale qu'il contient sur son anneau inférieur de même diamètre intérieur que la conduite. Je reviendrai ultérieurement sur les détails relatifs à la marche automatique.

Si, au contraire, on réduit la pression intérieure à ce qui peut être commode pour maintenir la fermeture du tube mobile sur son siège, il sera évidemment beaucoup moins difficile de le lever. Si même on supprime entièrement cette pression intérieure en donnant au tube mobile le même diamètre qu'à la conduite, pour ne lui faire presser son siège inférieur qu'en vertu de son poids d'ailleurs plus ou moins équilibré, on pourra au besoin assurer la fermeture dont il s'agit, quand l'appareil ne marchera pas, en appuyant sur son sommet au moyen d'une pièce articulée facile à ôter lorsqu'on voudra le faire marcher.

Il faut cependant remarquer que si, pour le tube d'amont, il n'est pas indispensable de prendre des précautions afin qu'il s'appuie sur son siège en vertu d'une pression du liquide autour de son pied, garni au besoin d'un rebord extérieur, il y a une raison pour laquelle il est utile de conserver une partie de cette pression pour le tube d'aval. En effet, si l'on ne veut pas ajouter un clapet au système pour faire entrer de l'eau du bief d'aval, quand il y aura une certaine vitesse acquise dans le tuyau de conduite, il faudra que le tube vertical d'aval se lève avant que l'eau en mouvement soit trop descendue dans la conduite, où il est évidemment plus qu'inutile d'introduire de l'air. Or, si ce tube a un diamètre plus grand que son anneau inférieur, quand l'eau qu'il contient sera descendue assez bas en suivant celle du tuyau de conduite pour ne plus presser aussi fortement cet anneau, il pourra se lever de lui-même au moyen d'un contre-poids, sans que l'on ait à craindre une distraction de l'éclusier.

Si le versement se fait en même temps au sommet des deux tubes verticaux pour l'eau qui rentre au bief supérieur, il devrait y avoir plus d'avantage que si le versement se faisait au sommet d'un seul pour un assez long tuyau de conduite. Mais pour celui de Chaillot, quand l'expérience a été faite en versant l'eau élevée par un seul tube avant que celui d'amont fût posé, l'effet utile en eau relevée n'a pas été sensiblement moindre qu'après la pose de ce second tube. Cela dépend des pertes quelconques résultant de ce qu'à chaque période les deux tubes verticaux doivent se vider, et surtout de ce que, dans les premières périodes, les oscillations en retour étant loin de les vider jusqu'au bas, le reste de ce qu'ils contiennent d'eau au-dessus du niveau du bief d'aval tombe dans ce bief sans être utilisé.

Plus le tuyau de conduite sera long, plus cet avantage indiqué par la théorie devra être appréciable, parce qu'il y aura moins de périodes ; de sorte qu'il est probable qu'on pourra diminuer la perte de force vive en ajoutant dans le réservoir

d'amont un tube vertical fixe ayant seulement pour but de diminuer les vitesses de sortie du liquide versant dans le bief supérieur à cette époque de l'opération, comme si ce versement se faisait par un orifice évasé, quoiqu'il faille ici tenir compte de l'effet des coudes.

Sans entrer encore dans ces détails, je dois rappeler que des expériences sur un modèle de cette écluse ont été l'objet d'un premier rapport favorable au Conseil général des ponts et chaussées en 1849, par M. Belanger, ingénieur en chef des ponts et chaussées. La Commission dont il était rapporteur avait constaté que ce système épargnait environ les trois cinquièmes de l'éclusée. En 1851, des expériences furent faites plus en grand, mais seulement sur une écluse de petite navigation. Comme il ne s'agissait que d'un essai très provisoire, on se servit des matériaux qu'on avait à sa disposition. De sorte que les tuyaux de conduite d'un diamètre intérieur de $0^m,625$ à $0^m,63$ n'étaient faits qu'avec des feuilles de zinc, d'environ deux millimètres d'épaisseur. Ces expériences confirmèrent avantageusement celles qui avaient été faites en petit et montrèrent que de grandes colonnes liquides pouvaient ainsi fonctionner sans inconvénient dans des enveloppes aussi fragiles. Elles confirmèrent d'ailleurs en grand un phénomène de succion décrit dans la première partie. Elles furent l'objet d'un rapport favorable par feu M. Méquet, inspecteur général des ponts et chaussées. Des expériences beaucoup plus en grand ont été faites depuis sur ce système, et elles ont été l'objet d'un rapport favorable dont un extrait officiel, revêtu de la signature de M. Dumoustier, chef de division au ministère des travaux publics, est joint au présent mémoire. Mais il est intéressant d'ajouter aux chiffres notés par la Commission le simple énoncé du résultat obtenu quand l'appareil était encore en meilleur état, ayant été longtemps abandonné par suite de causes de force majeure entièrement étrangères à l'état de la question.

Le rendement avait été augmenté quand l'appareil était

neuf, et quoiqu'il soit prudent de s'en tenir à des chiffres moins élevés dans la pratique, il est intéressant de conserver la trace des principaux résultats obtenus.

Dans les petits modèles ou dans les appareils pour lesquels le tuyau fixe n'est pas assez long par rapport à la chute, il est beaucoup plus difficile de régler les périodes, parce que l'inertie de l'eau qui se met en mouvement dans ce tuyau de conduite n'en laisse pas le temps. Il en résulte qu'on laisse l'eau acquérir trop de vitesse, notamment dans les première périodes, où agit la plus grande partie de la hauteur de chute.

Cela était facile à voir dans certains cas, à l'époque où l'écluse se vidait, en jetant de l'eau par le sommet d'un tuyau vertical. Dans les nouvelles expériences, le tuyau de conduite fixe a 1 mètre de diamètre intérieur et environ 42 mètres de long. La chute étant d'environ $1^m,60$, et ayant même été notablement plus grande dans diverses expériences, on a mieux saisi le temps nécessaire pour lever chaque tuyau mobile, en un mot, pour faire les manœuvres de manière à ne pas laisser échapper à chaque période plus d'eau qu'on ne le voulait; aussi, en vidant l'écluse, on a relevé les deux cinquièmes environ de l'éclusée. Il est vrai que dans ce cas on avait notablement augmenté le nombre des périodes.

La seconde partie de l'appareil, nécessaire pour remplir l'écluse, en tirant une partie de l'eau du bief d'aval, ne fut pas alors essayée en grand, à cause de difficultés locales résultant des dispositions des anciens bassins de Chaillot, qui étaient sur le point d'être démolis; mais il résultait des phénomènes suffisamment étudiés dans les expériences sur un modèle, que l'effet utile de cette seconde opération ne pouvait pas différer beaucoup de celui de la première, d'autant plus que pour le modèle dont il s'agit, l'effet utile quant à la vidange différait assez peu de celui qui a été constaté par la Commission pour la vidange faite au moyen du plus grand appareil.

De sorte que l'épargne totale résultant des deux opérations

ne pourrait pas être moindre probablement que les quatre cinquièmes environ de l'éclusée, si l'on voulait multiplier les périodes dans le cas où l'on en aurait le temps. Quant à l'effet utile maximum de l'opération faite en grand dans ces conditions, je n'ai pas cru devoir m'en rapporter à moi-même ; il a été vérifié en mon absence par M. Briquet, conducteur principal des ponts et chaussées en retraite, très estimé dans ce corps, qui m'autorise à m'appuyer sur son témoignage. Mais il ne faut pas oublier qu'il ne s'agit pour ce maximum que du cas exceptionnel où, dans les conditions précitées, les périodes pourraient être assez nombreuses.

Dans le système tel que je l'avais présenté d'abord, l'eau relevée au bief supérieur ne devait sortir que par un seul orifice. J'ai déjà fait quelques essais d'une manœuvre nouvelle au moyen du versement au sommet des deux tubes verticaux, et j'espère encore résoudre ainsi une difficulté très bien comprise dans le savant rapport de M. l'ingénieur en chef Belanger.

Il paraît utile en principe d'évaser l'extrémité d'aval du tuyau de conduite, destiné à recevoir un tuyau vertical mobile rejetant alternativement de l'eau au bief supérieur, à l'époque où l'écluse se vide. Mais on se demandait si l'augmentation de diamètre qui en résulterait pour ce tube mobile, etc., n'augmenterait pas la difficulté de la manœuvre. Maintenant l'eau peut sortir, non seulement par le sommet de ce tube, mais par le sommet d'un autre tube disposé sur le tuyau de conduite fixe, dans une capacité remplie d'eau en communication avec celle du bief supérieur; et quoique jusqu'à présent cela n'ait point paru conduire à un effet utile plus grand, il y a lieu d'espérer que cela y conduira quand on aura encore diminué le nombre des périodes par une augmentation de longueur de tuyau de conduite.

Une grande longueur a jusqu'à présent été une cause d'augmentation de l'effet utile, et j'en ai tenu compte dans les derniers projets que j'ai soumis à l'administration des ponts et

chaussées. Cependant je ne propose pas encore un troisième tuyau vertical entièrement fixe, dont j'ai cru devoir dire quelques mots ci-dessus parce qu'il est intéressant de conserver la trace de cette idée, abstraction faite même de son utilité immédiate.

Mais avant d'entrer dans plus de détails, je vais donner les résultats principaux des expériences faites sur le système réduit à sa plus simple expression, aux anciens bassins de Chaillot, par une Commission d'inspecteurs généraux des ponts et chaussées. On avait disposé les choses de manière à opérer comme si l'on avait eu à sa disposition une écluse de navigation d'une section analogue à celle des écluses du canal du Centre.

Résumé du Rapport adressé à S. E. M. le Ministre de l'agriculture du commerce et des travaux publics sur le fonctionnement d'une machine hydraulique présentée par M. de Caligny et ayant pour objet :

1° *Pendant la vidange des écluses, de faire remonter dans le bief d'amont une partie des eaux du sas ;*

2° *Pendant le remplissage, de se servir dans une certaine proportion des eaux du bief d'aval pour coopérer à ce remplissage.*

« Le Rapport dit au début quelles ont été les dispositions prises dans les bassins de Chaillot pour y faire une application du mécanisme inventé par M. de Caligny ; il donne ensuite la description de ce mécanisme et s'explique sur la manière dont il faut le faire fonctionner ; il constate qu'eu égard aux dimensions des bassins, aux volumes d'eau employés, à la longueur et au diamètre de la conduite qui fait communiquer le bief d'amont avec celui d'aval, les résultats des expériences peuvent être considérés comme étant très sensiblement les mêmes que ceux qu'on obtiendrait dans la pratique ordinaire.

« Il rend compte ensuite des expériences faites sous les yeux de la Commission.

« Eu égard aux dispositions locales adoptées pour ces expériences, la chute de l'amont à l'aval doit être considérée comme ayant une valeur de 1m,58.

« Le nombre de périodes employé pour faire fonctionner l'appareil a été de douze ; la durée moyenne de chacune a été de 32 secondes, la durée totale du fonctionnement a été de 6m,20s.

« Pendant ce temps, le niveau de l'eau dans le sas s'est abaissé de 1m,16.

« La quantité d'eau relevée a été de 82 mètres cubes, celle de l'eau dépensée 200mc,30, de sorte que le rapport de l'une à l'autre est de 41 p. 100.

« Le fonctionnement de l'appareil a été arrêté après la douzième période, parce qu'en ce moment la quantité d'eau relevée a été jugée à peu près insignifiante, et que si l'on avait voulu continuer la vidange par ce moyen, il aurait fallu prolonger la durée de l'opération dans une proportion inconciliable avec les besoins d'un service de navigation.

« Il suit de là que, pour une chute de 1m,58, la considération de temps ne permet pas de se servir de la machine au-delà de l'abaissement de 1m,16. C'est pour cet abaissement seulement que l'effet utile est de 41 p. 100; mais pour que le sas soit complètement vidé, il faut encore écouler une tranche de 1m,58—1m,16, soit 0m,43, qui représente un volume de 74 mètres cubes, lequel, ne pouvant plus être utilement extrait par l'appareil, devra s'écouler par les moyens ordinaires.

« En résumé, l'éclusée totale se trouve composée, savoir :

1° De la quantité d'eau ci-dessus vidée pendant le fonctionnement de l'appareil. . .	200mc,30
2° De celle évacuée à la fin par les moyens ordinaires.	74mc,00
Total,	274mc,30

« En conséquence, le rapport définitif de l'effet utile à l'effet total est mesuré par la fraction $\frac{82}{274,3}$, soit 30 p. 100.

« La Commission exprime l'avis que ce chiffre doit être considéré comme un minimum, parce que des pertes d'eau évidentes existent dans l'appareil construit depuis trois ans, dans des conditions d'exécution assez grossières.

« M. de Caligny ayant exprimé l'opinion qu'il y aurait de l'avantage à prolonger la durée de chaque période, il a été procédé sous les yeux de la Commission à une nouvelle expérience : la chute de l'amont à l'aval a été de $1^{m},38$.

« Le nombre de périodes a été de sept dont la durée moyenne a été de 37 secondes; le temps total employé a été de $4^{m},19^{s}$. Le niveau de l'eau dans le sas a baissé de $1^{m},18$; le débit total est donc de $202^{mc},96$, et comme on a relevé $76^{mc},14$ d'eau, il s'ensuit que le rapport de l'effet utile à l'effet total est de 37 p. 100. Si l'on a égard à ce que la chute était moindre cette fois que la première, on trouve qu'à conditions égales les mesures des effets seraient sensiblement équivalentes.

« Mais on a sensiblement gagné au point de vue du temps, puisqu'on n'a employé que $4^{m},19^{s}$ au lieu de $6^{m},20^{s}$ pour un abaissement qui même a été un peu plus grand dans le second cas que dans le premier.

« On a, en outre, gagné en ce que la tranche de fond à évacuer par les moyens ordinaires n'a été que de $0^{m},20$ de hauteur au lieu de $0^{m},43$.

« Somme toute, l'éclusée complète représente cette fois $237^{mc},36$; l'eau élevée est de $76^{mc},14$: l'effet utile a donc pour mesure la fraction $\frac{76,14}{237,36}$, soit 32 p. 100.

« En résumé, en prolongeant la durée des périodes, on a eu, même pour une chute moindre, un effet utile plus grand, et on a sensiblement abrégé la durée de l'opération, ce qui confirme l'opinion exprimée par M. de Caligny.



« Relativement au remplissage du sas, la commission n'a pu rien constater à cet égard, parce que les conditions prises à Chaillot ne le permettaient pas.

« Mais d'après un rapport de M. Belanger, ingénieur en chef, adressé à la date du 9 décembre 1849 à M. le ministre des travaux publics, l'effet utile pendant l'opération du remplissage serait de 28 p. 100.

« Ce rapport rend compte d'expériences faites sur un appareil de petit modèle dans lequel quelques dimensions ne sont pas dans une complète proportionnalité avec celle des appareils établis à Chaillot.

« La Commission ne déduit d'ailleurs de cette absence de proportionnalité aucune conclusion favorable ou contraire; elle se borne à la mentionner comme un fait, n'ayant pas eu les moyens de procéder aux essais comparatifs qui auraient pu permettre d'en apprécier l'influence.

« *Conclusions.* — Sous la réserve exprimée par les observations qui précèdent, la commission pense que l'appareil de M. de Caligny est d'une conception ingénieuse et simple; qu'il pourrait offrir dans certains cas les moyens de réduire la consommation d'eau sur les canaux de navigation, et qu'à ce titre il mérite de fixer l'attention de l'administration.

« Elle est, en conséquence, d'avis qu'il y a lieu d'engager M. de Caligny à rechercher sur un de nos canaux une localité placée dans des conditions favorables, à se mettre en rapport avec les ingénieurs de ce canal et à se concerter avec eux, soit sur les dispositions à prendre, soit sur les dépenses à faire pour l'établissement de sa machine auprès d'une écluse.

« Ce n'est que lorsque ces renseignements lui seront parvenus que l'administration sera à même de se prononcer sur l'application qu'il pourrait y avoir lieu de faire de l'appareil de M. de Caligny aux canaux dans lesquels les moyens d'ali-

mentation sont insuffisants, et pour lesquels il importe particulièrement de diminuer la consommation d'eau.

« Le rapporteur de la commission,
« Signé : VALLÈS.

« Pour copie conforme :

« Le chef de division,
« Signé : DUMOUSTIER. »

Les usages de l'administration n'ayant pas permis de me communiquer officiellement le rapport entier, il me paraît utile, pour éviter tout malentendu, de faire la remarque suivante. Ainsi que je l'ai dit ci-dessus, dans le cas où l'on ne craindrait pas d'augmenter la durée des manœuvres, il y aurait, en général, de l'avantage, quant à l'épargne de l'eau, à multiplier le nombre des périodes dans des limites assez étendues, si ces manœuvres étaient toujours parfaitement exécutées. Mais plus elles sont nombreuses, plus il y a de chances pour que l'éclusier ait quelque distraction. Aussi, dans les expériences que j'ai faites à Chaillot, j'ai reconnu que, par exemple, pour le cas où le nombre des périodes de vidange était de seize, il était utile que la marche des cinq ou six dernières périodes fût *entièrement automatique*, ce qu'il a été facile d'obtenir.

Le diamètre du tube d'aval était de $1^m,10$, tandis que son anneau inférieur n'avait qu'un diamètre intérieur d'un mètre comme le grand tuyau de conduite en tôle. Ainsi que je l'ai expliqué, page 335, il y avait cinq lames courbes concentriques, à l'extrémité du tuyau de conduite, sur laquelle était posé le siège du tube d'aval. Le coude sur lequel était ce siège avait un rayon de courbure extérieure égal à celui du tuyau, et n'avait pas de courbure à l'intérieur.

Etudes sur les oscillations des grandes nappes liquides faites depuis le Rapport précédent.

Quand un bief est extrêmement court, il ne s'agit pas seulement d'épargner l'eau par l'ensemble des deux opérations de remplissage et de vidange. Il faut que, pendant le remplissage, la quantité d'eau prise au bief d'amont n'y fasse point baisser le niveau de manière à faire toucher les bateaux qui s'y trouvent, quand même la quantité d'eau restituée au bief d'amont pendant la vidange serait aussi grande qu'on pourrait le désirer.

Si l'on dispose à l'extrémité du contre-fossé, près du bief d'aval, une sorte de grand clapet, pouvant d'ailleurs au besoin se fermer de lui-même au moment voulu, on peut transformer par ce moyen ce contre-fossé en une sorte de *bassin d'épargne*, dont les parois sont supposées s'élever au besoin à une hauteur convenable, même au-dessus de ce grand clapet.

Cette disposition peut être utilisée de plusieurs manières : d'abord, même dans le cas où l'on n'aurait pas à se préoccuper d'un bief d'amont très court, à partir du moment où l'appareil de vidange ne relèvera plus que peu d'eau au bief supérieur, on pourrait encore utiliser en partie la tranche d'eau qui restera dans l'écluse.

Quand même il n'y aurait pas à considérer l'effet du mouvement acquis dans le grand tuyau de conduite pendant qu'on versera de l'eau de cette tranche dans cette espèce de bassin d'épargne, on conçoit déjà qu'on pourrait épargner une portion de cette tranche pour la faire ensuite rentrer en partie dans l'écluse quand on voudra remplir celle-ci.

Mais il est intéressant de remarquer que l'écoulement de l'eau du sas ne peut se faire sans engendrer dans le grand tuyau de conduite de la force vive, d'où il résultera que le

niveau baissera dans l'écluse au-dessous de celui de l'eau entrée dans le bassin d'épargne.

Lorsque ensuite, après avoir fait sortir par les moyens ordinaires ce qui restera d'eau dans le sas, on voudra commencer le remplissage de ce dernier, on obtiendra du fossé de décharge vers le sas une grande oscillation qui fera baisser l'eau dans cette espèce de bassin d'épargne au-dessous du niveau de celle qui entrera dans le sas. Quant à l'eau qui restera dans le contre-fossé au-dessus du niveau du bief d'aval, à partir du moment où l'appareil de remplissage fonctionnera, on aura à la puiser moins bas que le niveau du bief d'aval, dont ensuite le clapet pourra au besoin s'ouvrir de lui-même quand l'eau sera suffisamment baissée dans le contre-fossé.

Dans diverses circonstances on peut substituer au contre-fossé un bassin d'épargne sans aucune communication avec le bief d'aval.

Au lieu de jeter dans ce dernier bief la partie de l'éclusée qui, pendant le jeu de la machine de vidange, ne sera pas relevée au bief supérieur, on pourra la laisser tomber dans le bassin d'épargne. On en relèvera moins au bief supérieur, par la raison même que le niveau s'élèvera dans ce bassin d'épargne. Mais on pourra diviser les effets de manière à avoir beaucoup moins d'eau à tirer du bief supérieur pendant la durée de la partie de l'opération consacrée au remplissage du sas, à cause de la quantité d'eau qu'on trouvera dans ce bassin latéral.

Il faut d'ailleurs remarquer qu'on peut y faire élever l'eau plus haut que dans le sas, parce qu'à partir de l'éqoque où l'appareil de vidange ne marchera plus utilement, à cause du rapprochement des niveaux montant et descendant, on pourra encore jeter, d'une manière analogue à ce qui a été expliqué ci-dessus, une quantité d'eau considérable du sas dans ce bassin par une grande oscillation.

Lorsqu'on voudra remplir l'écluse, l'eau du bassin d'épar-

gne y entrera tout naturellement avant qu'on fasse marcher l'appareil. Mais en y entrant elle engendrera une grande quantité de force vive dans le tuyau de conduite, et il en résultera, comme on le conçoit d'après ce qui a été dit ci-dessus, que l'eau montera dans l'écluse à une certaine hauteur au-dessus du niveau où elle descendra dans le bassin d'épargne. Si l'on fait ensuite marcher l'appareil de remplissage, il faudra tenir compte de ce que l'eau restée dans le bassin d'épargne se trouvera à un niveau plus élevé que celui du bief d'aval, de sorte qu'on aura à la puiser de moins bas que si elle était tirée de ce dernier bief.

Le bassin de communication entre le bief supérieur et la tête de la machine peut être utilisé d'une manière intéressante par deux grandes oscillations, l'une de haut en bas à la fin du remplissage de l'écluse, l'autre de bas en haut au commencement de la vidange.

Quand l'appareil de remplissage ne marche plus assez utilement à cause du rapprochement du niveau qui s'y élève, il suffit de lever le tube vertical qui établit alternativement la communication entre ce bassin et l'écluse, pour jeter encore une quantité d'eau considérable dans cette dernière, sans la prendre au bief d'amont, si la communication entre ce bief et ce bassin est interrompue en temps utile au moyen d'une sorte de grand clapet ou de porte de flot.

Lorsque ensuite on voudra vider l'écluse, on pourra profiter de la baisse produite dans ce bassin intermédiaire par l'oscillation dont on vient de parler pour obtenir, avant de mettre l'appareil de vidange en train, une première grande oscillation de vidange qui fera évidemment sortir d'autant plus d'eau du sas, qu'elle aura trouvé le niveau plus bas dans le bassin dont il s'agit.

On peut, au reste, modifier ces effets en considérant la question de la manière suivante. On pourra achever complètement le remplissage du sas à partir du moment où l'appareil ne marchera plus d'une manière assez utile au moyen

d'une seule grande oscillation, si l'on ne ferme pas immédiatement la communication entre ce bassin intermédiaire et le bief d'amont. On conçoit en effet que si l'écoulement de ce bassin vers l'écluse est entretenu pendant un temps convenable et que la communication entre ce bassin et le bief d'amont soit fermée à un instant voulu, les choses pourront être calculées de manière qu'il se fasse dans ce bassin une baisse considérable qui ne se terminera qu'à l'époque où le sas sera rempli.

Pour éviter tout malentendu, je tiens à rappeler moi-même que l'idée de vider un sas d'écluse en relevant une partie de l'eau au bief supérieur au moyen d'un bélier non automatique, et de disposer ce même bélier hydraulique de manière à remplir le sas en tirant une partie de l'eau du bief inférieur, n'est pas nouvelle. Mais je supprime précisément le *principe du bélier* en employant des tubes mobiles, quoiqu'ils interrompent alternativement la communication entre le grand tuyau de conduite et les biefs d'amont ou d'aval; de plus, je rends l'appareil en partie automatique, au moins dans les limites pour lesquelles il est utile de se débarrasser des inconvénients que pourraient avoir les distractions de l'éclusier.

M. le général Poncelet me conseilla de donner le nom d'anti-béliers à l'ensemble de mes appareils dans lesquels, par divers moyens, je supprime les coups de bélier. Il m'autorisa à dire, comme je l'ai fait dans des notices distribuées de son vivant aux membres de l'Académie des sciences, que c'était lui qui m'avait donné ce conseil.

Je ne trouve pas qu'on ait jamais fait aucun essai d'application du bélier hydraulique au remplissage et à la vidange des écluses, sans doute à cause de la difficulté de construire cette machine sur une assez grande échelle; tandis que dans les *anti-béliers* on ne bouche jamais les *sections transversales des tuyaux*, afin d'éviter les changements brusques de vitesse. Le *bouillon* de sortie se redresse, il est vrai, comme on l'expliquera plus au long ultérieurement, au lieu de passer dans un

orifice annulaire resté alternativement libre, par la levée d'un tuyau; les filets liquides montent dans les tubes verticaux, lorsque l'écluse se vide, ou, si elle se remplit, se meuvent sans inconvénient à l'extérieur du tube d'amont qu'ils entourent.

Application aux écluses multiples, et notamment aux écluses doubles.

L'avantage de ce système consiste principalement en ce qu'il coûtera beaucoup moins cher pour épargner l'eau dans les écluses de navigation existantes que d'autres moyens proposés par divers auteurs ou par moi-même. Il paraît d'ailleurs ne pas devoir occasionner une dépense proportionnelle au nombre de sas accolés.

Il suffit que chaque sas se vide ou se remplisse en un même temps donné, je veux dire si les sas sont égaux, et si l'un ne prend pas plus de temps que l'autre pour le remplissage ou la vidange, la vitesse de l'écoulement dans un sens ou dans l'autre sera la même pour chaque sas, et par conséquent quelle que soit la chute totale de leur ensemble.

Il en résulte que la moyenne de ce qu'on appelle *les hauteurs dues* aux vitesses d'écoulement sera d'autant moindre, par rapport à la chute totale, que cette dernière sera plus grande. Il est vrai, comme on verra plus loin, que la longueur du tuyau de conduite sera augmentée s'il y a un plus grand nombre de sas accolés; mais il résultera de ce que je viens de dire une diminution dans la somme d'une partie des pertes de force vive. Il y a donc lieu d'espérer qu'en définitive on pourra, dans certaines limites, diminuer, au besoin, le diamètre de ce tuyau de conduite. On n'aura d'ailleurs qu'une seule tête de machine pour tous les sas accolés.

Je suppose, d'abord, qu'il ne s'agit que de deux sas accolés;

on pourra y appliquer l'appareil tel qu'il a été essayé pour une écluse simple, du moins si les sas n'ont chacun que des hauteurs modérées. Le réservoir destiné à mettre l'appareil en communication avec le bief supérieur sera disposé en amont du sas le plus élevé, et latéralement comme pour une écluse simple. Ce réservoir et la tête de l'appareil seront d'ailleurs disposés comme si le sas le plus élevé avait la hauteur de la chute totale des deux sas. Les choses peuvent à la rigueur ne différer en principe qu'en ce que l'autre extrémité du tuyau de conduite devra se bifurquer de manière à pouvoir être mise alternativement en communication avec chacun des deux sas, l'autre sas étant alternativement isolé par un mode de fermeture convenable.

Il est facile de voir, au moyen de cette disposition générale, qu'on peut vider le sas supérieur en relevant une partie de l'eau au bief d'amont et remplir le sas inférieur en tirant une partie de l'eau du bief d'aval. Dans l'une et l'autre opération, la chute motrice sera bien plus grande que pour une écluse simple, à cause de l'augmentation de hauteur de chute provenant de l'un ou l'autre sas; de sorte que la fraction d'une éclusée relevée au bief d'amont et la fraction d'une éclusee tirée du bief d'aval seront l'une et l'autre bien plus grandes que pour une écluse simple.

Il est à remarquer, d'ailleurs, que pour une écluse simple, le système ne peut marcher utilement que pendant une fraction de la durée totale de chaque opération de remplissage ou de vidange, l'avantage de la continuation de l'emploi de l'appareil serait plus que compensé par la perte de temps. Or, pour les écluses à deux sas accolés, l'appareil peut marcher utilement, dans le cas précité, jusqu'à la fin de chaque opération pour chaque sas, parce qu'il restera encore une chute motrice exprimée par toute la hauteur de l'autre sas; de sorte qu'il n'est pas même nécessaire d'en achever la vidange ou le remplissage par les moyens ordinaires.

C'est surtout pour le cas où un bateau monte en trouvant

les deux sas vides qu'il est utile d'épargner l'eau; il est déjà facile de voir, au moyen de ce qui précède et des expériences faites sur une écluse simple, qu'une écluse à deux sas accolés ne dépensera pas plus d'eau qu'une écluse simple du système en usage, et qu'elle en dépensera même beaucoup moins.

Quant au remplissage du sas supérieur, si l'on commence avec l'appareil, on sera obligé de s'arrêter plus tôt que pour une écluse simple, parce qu'il faudra que l'eau du bief d'aval commence par monter à une hauteur égale à celle du sas inférieur. J'ai donc cherché à tirer du sas inférieur, supposé plein, une partie de l'eau qui doit remplir le sas supérieur.

Un tuyau de conduite beaucoup moins long que le premier peut mettre en communication le sas inférieur avec un réservoir intermédiaire, d'une assez petite section, disposé près de la tête de la machine. On conçoit que si l'eau du bief supérieur, en entrant dans le sas le plus élevé, a engendré de la force vive dans le plus long tuyau de conduite, et si l'on interrompt la communication entre ce tuyau et l'eau du bief supérieur pour l'établir entre ce même tuyau et ce réservoir intermédiaire, l'eau qui entrera dans le système, en vertu de la vitesse acquise dans ce grand tuyau de conduite, viendra du sas le moins élevé au lieu de venir du bief inférieur, et sera, par conséquent, puisée à un niveau moins bas.

L'application de cette disposition secondaire, surtout aux écluses à plus de deux sas accolés, devra être étudiée par l'expérience. Mais on conçoit, d'après ce qui a été dit, que l'appareil pourrait, à la rigueur, marcher à peu près comme s'il n'y avait qu'un seul sas ayant toute la hauteur de la chute, c'est-à-dire que si les sas sont nombreux, presque toute l'eau du plus élevé sera relevée au bief supérieur. Presque toute l'eau du sas le plus inférieur sera puisée au bief d'aval. Les sas les plus élevés ne tirant pas d'eau du bief d'aval, les sas les moins élevés ne relèveront pas d'eau au bief d'amont.

Ce n'est guère que pour les écluses à deux sas qu'il n'en sera pas ainsi, sauf l'emploi de moyens plus délicats que je me réserve d'indiquer ultérieurement.

Il y a une remarque essentielle à faire pour les sas accolés assez nombreux. Si, pour les écluses à deux sas, les deux tubes verticaux de la tête de l'appareil peuvent être mobiles en entier, comme pour une écluse simple, il ne doit pas évidemment en être ainsi pour les chutes dépassant certaines limites.

Dans ce dernier cas, ces tubes verticaux ne peuvent être mobiles, à l'exception d'une vanne cylindrique ou soupape de Cornwall, disposée à l'extrémité inférieure de chacun d'eux. Il sera même intéressant, afin d'éviter de faire parcourir à l'eau un chemin inutile, pour des chutes assez grandes, de supprimer la partie de ces tuyaux supérieure à ces vannes ou soupapes. Mais alors, on bouchera le sommet de la petite partie fixe restante, et, par conséquent, il deviendra nécessaire de prendre certaines précautions dans la manœuvre, pour qu'il n'y ait pas de coups de bélier ; car on n'aura plus, comme pour les écluses simples et les écluses doubles, cet avantage que les sections transversales ne puissent jamais être bouchées.

C'est donc principalement pour les écluses simples et les écluses doubles que le principe apparaît plus spécialement dans toute sa simplicité. Pour ces deux genres d'écluses on peut appliquer de diverses manières les principes des grandes oscillations de nappes liquides.

Ainsi, il est clair qu'on pourra achever le remplissage du sas le plus élevé d'une écluse double au moyen d'une grande oscillation de haut en bas dans le réservoir de communication, entre la tête de la machine et le bief supérieur. Quand on videra le sas inférieur, on pourra profiter de la baisse du niveau dans ce réservoir par suite de cette grande oscillation, le tube d'amont étant levé en temps utile, comme on le verra mieux plus loin.

On pourra ensuite, en faisant gonfler l'eau, comme je l'ai expliqué, dans la rigole de décharge, alternativement transformée en bassin d'épargne, au moyen d'une grande soupape ou porte de flot, jeter par une grande oscillation une masse d'eau considérable qu'on fera rentrer en partie, quand ce sas se remplira, par une autre grande oscillation.

Quand l'eau se verse au sommet des deux tubes ou seulement de l'un d'eux, il se produit un effet très curieux au commencement de la vidange d'une écluse simple, effet qui se présentera aussi en général pour les écluses doubles, au commencement de la vidange du sas le plus élevé. Dans les premières périodes de l'appareil tel qu'il a été essayé, notamment à Chaillot, l'eau ne montant qu'à une petite hauteur au-dessus du niveau variable de celle qui se trouve dans l'écluse, il s'en élève une quantité vraiment énorme par rapport à celle qui descend au bief d'aval. Il peut sembler aux personnes qui n'ont jamais vu l'appareil que, même pour la première période, on va avoir une sorte de mouvement continu.

Cet effet a paru vivement impressionner tous ceux qui en ont été témoins. Mais à mesure que l'eau descend dans l'écluse, la quantité d'eau élevée diminue et finit par être insignifiante. En principe, il est facile de voir qu'abstraction faite des pertes de force vive, le travail disponible pouvant résulter de l'eau qui reste dans l'écluse diminue comme le carré de sa hauteur au-dessus du niveau du bief d'aval.

Ce genre d'effet ne se présentera pas de la même manière pour les écluses multiples, du moins quand la chute totale aura une grande hauteur. Dans ce cas, il sera convenable de faire verser l'eau dans le réservoir en communication avec le bief supérieur par-dessous, c'est-à-dire en soulevant une vanne cylindrique ou soupape de Cornwall, comme j'en ai déjà dit quelques mots ci-dessus. C'est pour ce soulèvement, qui doit se faire en temps utile, de manière à éviter toute chance de

coups de bélier, qu'il faudra prendre des précautions particulières dans le détail desquelles je n'entrerai pas ici (1).

(1) J'ai dit ci-dessus que le principal avantage que j'attribuais à ce système d'écluses était l'économie dans le capital de premier établissement. Mais je me suis aussi occupé d'autres systèmes d'écluses, et même M. Combes a bien voulu insérer une note à ce sujet dans le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, année 1846, p. 567. Voici cette note qu'il a présentée comme extraite du *Bulletin de la Société Philomathique de Paris :*

Moyen de faire fonctionner sans soupape l'écluse à flotteur et à double compartiment de Busby, par M. DE CALIGNY.

« M. Busby, ingénieur anglais, a pris, le 14 avril 1813, une patente pour un moyen d'épargner l'eau dans le service des écluses de navigation ordinaires, en disposant latéralement un réservoir circulaire en communication avec l'écluse, et dans lequel un flotteur à double compartiment monte et descend alternativement pour faire monter et descendre alternativement l'eau dans cette écluse.

« Les deux compartiments de ce flotteur sont séparés par un plancher horizontal. Quand le caisson flottant dont il s'agit descend, l'eau du bief supérieur remplit graduellement le compartiment supérieur au moyen de deux siphons, et l'eau du bief inférieur remplit en même temps le compartiment inférieur à l'aide de deux autres siphons. Quand le caisson flottant remonte, l'eau de chaque bief est restituée par la manœuvre, et l'eau baisse dans l'écluse.

« Ce système, qui a le même but que l'écluse à flotteur de Betancourt, mais n'a pas besoin d'être équilibré de la même manière, fonctionne au moyen d'une force motrice quelconque suffisante pour surmonter les résistances passives et l'inertie de tout l'ensemble des masses solides ou liquides.

« Il paraît que l'auteur anglais n'a point saisi d'une manière assez complète toute la généralité du principe qui lui est dû, et qu'il s'est même trompé en cherchant à faire voir comment doit se faire la manœuvre quand on veut que le système fonctionne sans le secours de l'éclusier, et cependant sans employer de soupape. Il est vrai que, dans ce cas, la section du flotteur doit être différente de celle de l'écluse, en y comprenant la section totale de la surface liquide contenue en dehors du flotteur; mais il faut qu'elle soit plus grande au lieu d'être moindre, comme dit l'auteur.

« Voici comment M. de Caligny reprend la question :

« Si un cylindre s'enfonce dans un niveau indéfini, il suffit, pour conserver l'équilibre, qu'il reçoive une tranche d'eau toujours égale à celle qu'il déplace ; mais s'il a de plus à refouler dans le sas d'écluse une tranche d'eau égale à cette dernière, il faut qu'il reçoive encore une

Détails rélatifs à une communication faite par M. l'inspecteur général Vallès à la Société Philomathique de Paris.

Depuis que ce qui précède est écrit, M. Vallès, inspecteur général des ponts et chaussées, a communiqué à la Société

tranche d'eau égale. Voilà pour quelle raison il ne suffit plus que l'on tire une seule tranche d'eau du bief supérieur ; il en faut aussi une seconde, qui est tirée du bief inférieur et entre dans le compartiment inférieur du caisson. Jusque-là, ceci s'accorde avec le résultat de Busby ; mais si la section de l'écluse est sensiblement moindre que celle du caisson cylindrique, la quantité de pression hydrostatique à refouler croîtra plus rapidement que celle qui est introduite dans le système par la tranche d'eau variable du bief inférieur. Il en résulte que l'écluse ne sera pas tout à fait remplie en vertu du refoulement du flotteur, en supposant même qu'au commencement de la descente un excès de poids ait rompu l'équilibre. Si donc on fixe, au moment de l'équilibre stable du système, le flotteur d'une manière quelconque, et qu'on achève de remplir l'écluse au moyen de l'eau du bief supérieur ; quand on voudra qu'elle se vide après l'introduction ou la sortie du bateau qu'il s'agit de faire passer, il n'y aura qu'à détacher le flotteur, parce que la pression prépondérante de l'écluse, en vertu de l'addition d'eau du bief supérieur, lui imprimera un mouvement en sens inverse pendant la durée duquel chaque compartiment rendra à chaque bief l'eau qu'il a empruntée, jusqu'à ce que le flotteur soit remonté à la hauteur dont il est descendu.

« Pour bien comprendre la manœuvre, il faut concevoir que si dans la première période le caisson est descendu, c'est parce que son poids était assez sensiblement prépondérant au commencement de la descente ; on l'avait de même attaché d'une manière quelconque et lâché au moment voulu, la section de l'écluse étant déterminée de manière qu'il ne s'enfonçât qu'à une profondeur donnée, afin que l'on pût le faire revenir sur ses pas au moyen de l'addition d'une force motrice qui est le poids de la tranche d'eau tirée du bief supérieur. Or, pendant l'ascension du flotteur, la colonne liquide de l'écluse, au lieu d'être à refouler, est au contraire la force motrice ; elle diminue plus vite que la colonne restituée au bief inférieur, et qui est destinée à contrebalancer la différence de principe de ce système avec celui d'un flotteur enfoncé dans un bief indéfini. Tout étant, jusqu'à un certain point,

Philomathique de Paris des détails sur les expériences en grand auxquelles a été soumis en sa présence mon nouveau système d'écluses. M. Vallès est le rapporteur de la Commission d'ingénieurs des ponts et chaussées qui a rendu compte au ministère des travaux publics des expériences dont il s'agit. Cette communication a été faite à l'occasion de l'extrait officiel du rapport qui a été présenté à la Société Philomathique et a été imprimé ci-dessus. Comme elle est une sorte de complément du rapport officiel, voici un extrait de la note remise par M. Vallès sur cette communication verbale :

inverse dans cette seconde période, on voit que l'équilibre aura lieu lorsqu'il restera dans l'écluse une certaine hauteur d'eau. Quand l'ascension du flotteur sera finie, on l'accrochera, on videra ce qui restera dans l'écluse au dessus du bief inférieur, et ainsi de suite quand on voudra recommencer la manœuvre pour le passage de quelque autre bateau. Si l'on n'a pas assez de force motrice pour faire remonter le flotteur à une hauteur convenable, on est libre d'en tirer une plus grande quantité du bief supérieur pendant une portion quelconque de la durée de la descente de l'eau dans l'écluse.

« M. de Caligny ajoute qu'il a toujours été effrayé de la dépense en capital nécessaire pour établir des écluses de ce genre, ainsi que des difficultés d'exécution et du peu de succès que des systèmes analogues ont eu dans la pratique ; mais il n'en était pas moins intéressant de montrer comment l'écluse à flotteur et à double compartiment peut être conçue de manière à empêcher toute chance d'accident dépendant de l'éclusier. Le système est alternativement réduit au repos en vertu de pressions simplement hydrostatiques, de manière qu'on n'ait pas à s'embarrasser beaucoup des difficultés relatives au règlement des niveaux. »

En reproduisant cette note, déjà ancienne, il est intéressant d'ajouter que ce système peut être appliqué, quoique avec moins d'avantage et de généralité, à ce que M. D. Girard et M. le général Poncelet ont proposé pour les écluses triples.

Au reste, mon principal but en rappelant ce système est de montrer que j'ai étudié la question sous diverses faces. Je crois toujours que par leur extrême simplicité, les appareils à colonnes oscillantes, objet du présent Mémoire, auront l'avantage essentiel de coûter beaucoup moins cher. Mais quant au rendement, si l'on n'avait pas à se préoccuper du capital de premier établissement, les écluses à flotteur dont il s'agit, étant d'ailleurs au besoin plus ou moins modifiées, épargneraient peut-être une quantité d'eau plus considérable.

« M. Vallès, après avoir donné des détails sur la construction et le jeu de l'appareil dont le principe est décrit dans les extraits des procès-verbaux de la Société, a remarqué particulièrement la facilité et la simplicité du jeu de ce système, disposé de manière que non-seulement il ne peut jamais y avoir de coups de bélier, parce que les sections transversales ne sont jamais bouchées, mais que les herbes charriées par les canaux ne peuvent jamais l'obstruer. La manœuvre est extrêmement simple, et l'opération totale de vidange ou de remplissage de l'écluse se fait avec toute la rapidité désirable.

« Si le rapport officiel a dû faire quelque réserve relativement à l'opération du remplissage, parce que les dispositions prises à Chaillot au moment où les anciens bassins allaient être démolis n'ont pas permis de vérifier l'effet utile constaté par M. l'ingénieur en chef Belanger sur un petit modèle, M. Vallès admet parfaitement ce résultat, en comparant surtout l'effet utile obtenu pendant la vidange par les expériences sur le modèle et sur le grand appareil essayé à Chaillot. M. de Caligny a d'ailleurs fait observer depuis la rédaction du rapport que, selon lui, s'il y avait du désavantage, ce serait, principalement à cause de diverses circonstances, l'effet utile du petit modèle qui devrait être trop faible. Il résulte d'ailleurs de détails inédits que s'il y a quelque différence de proportionnalité entre le grand et le petit modèle, les expériences sur ce dernier avaient été tellement variées, que la proportionnalité de la longueur du tuyau de conduite à la chute s'était même trouvée quelquefois en sens contraire, sans que cela eût bien sensiblement modifié le résultat.

« Quoi qu'il en soit, il est bien avéré, dit M. Vallès, que l'appareil remplit toutes les conditions désirables et coûte d'ailleurs beaucoup moins cher que d'autres moyens proposés pour épargner l'eau dans les écluses existantes. Un autre ingénieur en chef des ponts et chaussées qui en propose l'ap-

plication, même sur une écluse d'un canal latéral, a remarqué qu'outre les avantages d'épargner l'eau dans les canaux qui ne sont pas assez bien alimentés, ce système peut être très utile dans le cas notamment où, le bief d'amont ayant une très faible superficie, le produit de l'écluse d'aval fait baisser le niveau de ce bief de manière à faire craindre pour les bateaux chargés qui peuvent s'y trouver. Il peut l'être encore, selon le même ingénieur, dans le cas où une écluse est précédée immédiatement par une portion de bief rétrécie dans laquelle l'éclusée produit un courant rapide qui est une gène réelle à la marche des bateaux montants.

« Quant à l'abaissement du niveau dans le bief d'amont, lorsque ce dernier est très court, il faut, dans l'état actuel des écluses, lorsqu'il passe de suite plusieurs bateaux remontants, faire perdre aux mariniers un temps considérable pendant lequel l'éclusier de l'écluse supérieure donne au bassin l'eau qui en a été retirée par chaque éclusée. On conçoit d'ailleurs que, s'il y a quelque négligence, il peut se joindre à cette perte de temps une cause de danger réel que l'on n'aura plus à craindre au moyen d'un système convenable d'épargne de l'eau.

« Quant à l'effet utile sur lequel s'appuie le Rapport officiel, il est intéressant de remarquer qu'il a été obtenu avant que M. de Caligny eût présenté à l'Académie des Sciences et à la Société Philomathique divers moyens de l'augmenter par de grandes occillations de nappes liquides, étudiées par lui depuis cette époque, à l'occasion de l'application proposée en ce moment pour un bief d'amont très court. »

Cette communication de M. Vallès rappelant plus spécialement l'attention sur les expériences en petit, à cause de la manière intéressante dont elles se coordonnent avec les expériences en grand, il m'a semblé utile d'ajouter ici quelques détails sur ces expériences, qui furent répétées en présence d'une première Commission le 20 août et le 20 novembre 1847.

Voici un extrait du Rapport inédit de M. Belanger, plu-

sieurs fois cité dans ce qui précède, et qui a été approuvé par le Conseil général des ponts et chaussées en 1849 :

« ..... *Expérience constatant l'effet utile de cet appareil.*

« M. de Caligny, honorablement connu depuis assez longtemps par des recherches et des expériences sur des appareils hydrauliques de son invention, qui ont de l'analogie avec celui qui fait l'objet de ce Rapport, s'est livré à des calculs qui lui permettent d'espérer que, dans l'opération du remplissage, il fera monter du bief inférieur dans le sas un tiers de l'éclusée, et que dans l'opération de la vidange il fera remonter la même quantité d'eau du sas au bief supérieur. Il en résulterait qu'après avoir tiré de ce bief deux tiers de l'éclusée, on lui en rendrait un, de sorte que la dépense d'eau pour l'opération complète ne serait que le tiers de ce qu'elle est ordinairement.

« Les expériences faites sur un appareil de petite dimension établi aux frais de M. de Caligny chez M. Barbier, plombier, rue de Seine, ont, autant qu'on pouvait l'espérer, justifié les prévisions de l'inventeur.

« Le sas était représenté par un vase rectangulaire en plomb, dont les dimensions horizontales étaient $1^m,50$ et $0^m,80$. Le bief supérieur était remplacé par un autre vase en plomb plus petit, près duquel était un tonneau de jauge qui fournissait l'eau nécessaire à la dépense de ce bief. Le contre-fossé supposé en communication avec le bief inférieur était représenté par un réservoir en plomb de $5^m,20$ de longueur et de $1^m,50$ de largeur. Le tube horizontal allant du bief d'amont au sas était un tuyau en zinc de 10 mètres de longueur et de 1 décimètre de diamètre. Sur ce grand tube, et à $0^m,215$ de distance en aval du clapet d'amont, était embranché un petit bout de tuyau vertical en plomb de $0^m,14$ de diamètre, au-dessus duquel jouait le tuyau-soupape. Celui-ci avait $0^m,16$ de diamètre, excepté à sa partie inférieure, où le diamètre était de $0^m,128$.

« Les opérations suivantes ont été faites en présence du soussigné et de M. l'ingénieur en chef Frimot :

« 1° *Vidange du sas.* — Les deux vases représentant le sas et le bief d'amont ayant été remplis de manière qu'entre eux et le bassin qui figurait le bief d'aval il y avait une différence de niveau ou chute de 0m,49, M. de Caligny a ouvert le clapet d'aval et manœuvré le tuyau-soupape comme il est indiqué plus haut. Une partie de l'eau du sas est descendue en plusieurs périodes dans le bief inférieur; l'autre est remontée dans le bief supérieur, d'où elle s'est immédiatement déversée dans le tonneau de jauge. En remettant ensuite cette seconde partie dans le vase figurant le sas, on a constaté qu'elle y occupait une hauteur de 0m,142. Il en résulterait que la fraction d'éclusée relevée du sas dans le bief supérieur pendant la vidange avait été de $\frac{0,142}{0,49} = 0,31$.

« Cette opération s'est effectuée en 14 périodes, et a duré trois minutes.

« 2° *Remplissage du sas.* — Le remplissage du sas s'est fait par les manœuvres qui ont été précédemment décrites. A mesure que le vase représentant le bief d'amont fournissait son eau au sas, cette eau était remplacée par celle qu'un ouvrier puisait dans le tonneau de jauge. Le remplissage terminé, il a été constaté que l'eau élevée du bief inférieur dans le sas représentait un prisme de 0m,135 de hauteur ou une fraction d'éclusée de $\frac{0,135}{0,49} = 0,28$.

« La durée de cette opération et le nombre des périodes de la manœuvre ont été à peu près les mêmes que pour la vidange du sas.

« Ainsi, dans cette expérience en petit, l'épargne de l'eau pour le remplissage et la vidange du sas a été les cinquante-neuf centièmes de l'éclusée. »

Il est intéressant de remarquer que l'effet utile était un peu moindre que ne l'avait été celui de l'appareil pendant la vi-

dange, parce que le niveau baissait notablement dans le vase représentant le bief supérieur à chaque période, et que celui du bief inférieur baissait d'environ deux centimètres pendant le remplissage du sas, ce qui, d'une part, diminuait la pression motrice, et, de l'autre, augmentait la profondeur d'où il fallait tirer l'eau du bief d'aval.

Au contraire, dans l'opération de vidange, au commencement, le niveau de l'eau dans le bief d'aval était un peu au-dessous du niveau définitif pour l'époque où la chute était de 0m,49. Mais le petit avantage qui en résultait n'était peut-être pas même tout-à-fait compensé par l'élévation alternative de l'eau au-dessus du niveau normal du bief supérieur, parce que l'eau relevée devait ensuite se verser par une gouttière disposée au sommet du vase représentant ce bief, et d'où l'eau tombait dans un tonneau de jauge. Aussi, le rapport n'a pas mentionné ce détail. Si j'en dis quelques mots, c'est pour montrer avec quel soin les expériences ont été faites, en tenant compte des plus petites choses. Aussi celles qui ont été faites en grand les ont vérifiées avec avantage.

Quant à la baisse alternative dans le vase représentant le bief supérieur, elle était d'environ 4 centimètres, ce qui diminue sensiblement la moyenne de la chute. Je n'entrerai pas dans plus de détails à ce sujet, voulant seulement indiquer la cause de quelques légères différences entre l'effet utile pendant la vidange et pendant le remplissage.

En augmentant la durée de l'opération, j'ai augmenté notablement l'effet utile. Cependant, j'ai rarement vu l'épargne définitive s'élever aux deux tiers de l'éclusée pour ce petit modèle. J'ai dit plus haut pourquoi l'effet utile a pu être augmenté dans les expériences en grand, à cause de la facilité de la manœuvre.

Il faut tenir compte de ce que, pour cette chute, l'appareil de petit modèle n'était pas dans son état normal, le tuyau de conduite étant alors un peu trop court par rapport à la

chute. L'appareil avait d'abord été construit pour une chute de 20 à 23 centimètres. Il a été vu par la Commission dans ce premier état. L'effet utile était à peu près le même ; mais il est bien à remarquer que le nombre de périodes était seulement de six pour la vidange, et de six pour le remplissage. Il pouvait même, à la rigueur, être réduit à quatre ou cinq. La durée de chaque opération de vidange ou de remplissage était de quatre-vingt-quinze secondes ; elle pouvait même être notablement réduite.

Pendant le temps qui s'est écoulé entre les deux séances de la Commission, j'ai diminué la longueur du tuyau de conduite, et les chutes ont, dans diverses expériences, varié de 18 à 23 centimètres. J'ai constaté que la longueur du tuyau de conduite étant réduite à 6 mètres, l'opération se faisait dans le même temps, et sensiblement avec le même effet utile que lorsque le tuyau de conduite avait 10 mètres de long, mais que le nombre des périodes était sensiblement en raison inverse de la longueur de ce tuyau. Or, si l'on admettait que les dimensions homologues dussent augmenter comme celles de l'écluse, pour une hauteur de chute agrandie dans le rapport d'environ 5 à 2, on aurait dû augmenter la longueur du tuyau de conduite dans le même rapport, ce qui, pour la chute mentionnée dans le rapport de M. Belanger, aurait réduit le nombre de périodes à cinq ou six, comme pour la chute d'une vingtaine de centimètres. Au reste, il n'est pas indispensable que le tuyau de conduite soit aussi long par rapport à la chute, comme on l'a constaté dans des expériences en grand, je donnerai plus loin la théorie.

Pour tenir compte de la résistance opposée par les bateaux, j'ai construit avec des briques un mur vertical, disposé transversalement dans le vase représentant l'écluse, à une distance de la bouche du tuyau un peu plus grande que le double du diamètre de celui-ci. Je n'ai pu noter aucune différence sensible dans l'effet utile, par suite de cette disposition.

Quant au bief d'amont, j'ai adopté une disposition semblable, en y construisant une enceinte formée en maçonnerie de briques, noyée à une distance presque double du diamètre du tuyau, cette maçonnerie s'élevant d'ailleurs notablement au-dessus de ce diamètre. Je n'ai pas remarqué non plus qu'il en résultât aucune différence sensible dans l'effet utile. Si je fais cette dernière remarque, c'est seulement pour rassurer au besoin sur les petits détails de construction, car j'ai modifié la disposition de cette extrémité dans les expériences en grand, où j'ai complètement supprimé toute espèce de clapets. Je ferai donc seulement une dernière remarque.

Dans la première série d'expériences en petit vues par la Commission, l'extrémité du tuyau de conduite qui débouchait dans le bief d'amont était d'un diamètre peu différent de celui du reste de ce tuyau de conduite. Dans la seconde série d'expériences vues par la Commission, le diamètre de cette extrémité du tuyau était de $0^m,14$. Il se raccordait avec le reste au moyen d'un évasement dont l'angle était peu différent de celui de l'ajutage divergent de Venturi.

Dans les limites de ces expériences on ne put constater l'avantage résultant de cet évasement. Il était trop peu important par rapport aux diverses causes de perte de force vive et d'ailleurs le clapet d'amont, supprimé dans les expériences en grand, changeait l'état de la question. Quoiqu'il résulte maintenant d'expériences directes que l'utilité de cet ajutage divergent est incontestable, cela avait été une raison pour ne pas proposer d'abord d'évaser l'extrémité du tuyau de conduite qui porte la tête de la machine. Ainsi les expériences en petit peuvent conduire à des résultats au-dessous de la vérité, notamment à cause des résistances d'une espèce particulière qui se présentent pour les petites vitesses de l'eau. Quant à l'extrémité qui débouche dans l'écluse, abstraction faite de l'avantage résultant d'un évasement graduel pour épargner la force vive, il est important de le prescrire et même de l'exagérer, afin d'éviter les dangers qui pour-

raient résulter de l'introduction latérale de l'eau, quand il y a un bateau dans l'écluse.

Il ne paraît pas d'ailleurs indispensable, quant à la sûreté des bateaux, de donner au débouché du tuyau de conduite dans l'enclave des portes d'aval de l'écluse une section bien plus grande que la somme de celles des ventelles existantes, d'autant plus qu'il faut tenir compte d'une circonstance intéressante. L'inertie de l'eau du tuyau de conduite ne permet pas à cette eau de prendre la vitesse due à la hauteur de la chute. Les vitesses réelles, partant de zéro, finissent par redevenir nulles. On peut d'ailleurs, si l'on craignait un danger dans une circonstance particulière, interrompre la communication avec le bief d'amont ou celui d'aval, en baissant celui des tuyaux mobiles qui introduirait l'eau de l'un ou l'autre bief dans l'écluse au moment dont il s'agirait; car il est bien à remarquer que, même alors, les sections transversales ne seraient jamais bouchées. Je reviendrai ultérieurement sur les précautions à prendre pour la sûreté des bateaux.

Description des moyens d'employer le mouvement acquis des colonnes liquides à faire ouvrir d'elles-mêmes les portes d'écluses et à faire sortir de lui-même le bateau d'un sas. — Expérience en grand faite en Belgique.

Dans ce qui précède, j'ai considéré le mouvement acquis des grandes colonnes liquides seulement comme un moyen d'épargner l'eau dans les écluses de navigation. Il peut aussi être employé à accélérer d'une manière remarquable le service de ces écluses, abstraction faite de toute épargne de l'eau. J'avoue que je ne pensais pas d'abord à un mode d'accélération de la manœuvre quand j'ai donné la description générale du système, notamment dans le *Bulletin de la Société Philomathique de Paris*, journal *l'Institut*, séance du 14 décembre 1844. Je me suis aperçu depuis que cette disposition pouvait servir, lorsque la machine ne marchait pas et qu'on laissait des extrémités ouvertes, à introduire avec plus de fa-

cilité le bateau descendant dans le sas plein d'eau, parce qu'en entrant il peut chasser de l'eau par le tuyau de conduite, tel d'ailleurs que j'en avais prescrit la construction. Je dois dire que cette dernière idée paraît avoir été émise successivement par deux ingénieurs avant que j'eusse pensé moi-même à cette *propriété* de ma disposition générale, sans la réminiscence de laquelle d'ailleurs ils n'auraient peut-être pas eu cette idée intéressante. Je n'avais pas pensé non plus à la possibilité d'employer le mouvement acquis, *si l'on arrête le jeu de la machine*, ou plus sûrement si l'on ne prodnit qu'une grande oscillation de remplissage, à faire ouvrir d'elles-mêmes les portes d'amont et à faire entrer de lui-même le bateau dans le bief d'amont. Cette propriété nouvelle augmente l'importance pratique de mon système. Elle m'a d'ailleurs donné occasion de trouver une autre manœuvre, pour faire ouvrir d'elles-mêmes les portes d'aval et faire entrer de lui-même un bateau descendant dans le bief inférieur. Il est à remarquer qu'un *seul et même tuyau de conduite* peut, au moyen du jeu des tubes mobiles, faciliter l'entrée et la sortie des bateaux pour les deux biefs d'amont et d'aval, comme on le verra plus loin.

Je conviens que l'ouverture des portes d'amont, résultant du mouvement acquis de l'eau dans un tuyau de conduite, a pu être trouvée indépendamment de mon appareil d'épargne. Cependant je crois pouvoir me permettre de remaquer que j'avais, depuis longtemps, prescrit de faire déboucher le tuyau de conduite dans l'enclave des portes d'aval. Or, il était plus avantageux, quant aux effets dont il s'agit, de pousser le bateau à l'arrière, et sans cela il n'aurait peut-être pas été jusqu'à pénétrer ainsi dans le bief d'amont (1).

(1) On verra plus loin en quoi consistent les avantages résultant de ce que le tuyau de conduite peut déboucher à une autre place. Mais il m'a paru intéressant d'appeler l'attention sur une propriété de cet emplacement de l'embouchure, tel que je l'avais depuis longtemps décrit et dessiné.

Ces résultats sont réellement une propriété de la disposition générale que j'avais adoptée. On peut le dire sans diminuer en rien le mérite de l'auteur de l'expérience dont je viens de parler. D'ailleurs, quand même l'exhaussement de l'eau dans le sas ne résulterait pas des formules que j'avais depuis longtemps établies, il eût été difficile d'appliquer sur une assez grande échelle mon système de remplissage, sans s'en apercevoir; c'est-à-dire qu'à partir de l'époque où j'avais prescrit de ne plus faire marcher l'appareil, le mouvement acquis de l'eau dans le tuyau de conduite devait nécessairement occasionner cet exhaussement, de manière à indiquer les effets plus puissants qui se présenteraient si le remplissage de l'écluse se faisait par une seule grande oscillation.

On savait depuis longtemps, par l'exemple du canal de Briare, qu'on pouvait faire entrer l'eau dans un sas ou l'en faire sortir par des tuyaux d'une petite longueur appelés *larrons*. Mais, malgré les études faites à l'occasion du bélier hydraulique, personne, à ce qu'il paraît, ne s'était aperçu à ce canal qu'en donnant plus de longueur à ces tuyaux, on y profiterait de la vitesse acquise de l'eau, tellement perdue dans ces anciennes manœuvres, qu'on n'avait jamais remarqué qu'il en résultât une dénivellation dans le sas à la fin de chaque opération de remplissage ou de vidange.

J'ai montré par l'expérience et le calcul dans quelles limites il y a de l'avantage à donner une assez grande longueur aux tuyaux des colonnes liquides oscillantes de vitesses et de diamètres convenables. J'ai même eu quelque peine à le faire admettre dans les premiers temps de mon arrivée à Paris, jusqu'à l'époque où M. Coriolis me fit l'honneur de vérifier par l'analyse les résultats que j'avais d'abord obtenus par l'expérience et la Géométrie dans une province reculée où j'avais fait moi-même ma première éducation scientifiqne, et d'où j'ai apporté à Paris les principes pour lesquels l'Académie des sciences m'a honoré du prix de mécanique en 1839.

Personne ne me conteste les expériences dont il s'agit;

mais je crois intéressant de déclarer au besoin que, pour mes premières expériences, je pourrais prouver légalement une date certaine par une lettre de mon illustre ami Le Verrier, pliée de manière à conserver le timbre de la poste du 21 mai 1833.

Un des savants les plus distingués de la Belgique, M. Maus, directeur général des ponts et chaussées, membre de l'Académie des sciences de Bruxelles, a obtenu le résultant suivant :

L'eau entre dans l'écluse d'Herbières par un long tuyau en maçonnerie de 4 m. c., de section, débouchant par une extrémité dans le bief d'amont, et par l'autre dans le sas le plus près possible des portes d'aval. M. Maus n'a pas osé faire déboucher ce tuyau dans l'enclave même des portes d'aval, ainsi que je l'ai fait pour l'appareil considéré comme moyen d'épargner l'eau, par des raisons relatives à la solidité des constructions dans un mauvais terrain. Il en est résulté que cette extrémité est plus gênée par la présence des bateaux dans l'écluse qu'elle ne devrait l'être dans d'autres localités.

Malgré cette circonstance défavorable, la vitesse acquise dans ce grand tuyau a fait monter l'eau dans l'écluse au-dessus du niveau du bief d'amont. Il en est résulté que les portes d'amont se sont ouvertes d'elles-mêmes, et que le bateau est entré de lui-même dans le bief d'amont.

Cela permet de simplifier la manœuvre des écluses de navigation, de diminuer le travail de l'éclusier, et surtout la durée de cette manœuvre. On sait comment le passage du bateau de l'écluse dans le bief d'amont était une cause de perte de temps.

Lorsqu'un bateau descendant entrera ensuite dans l'écluse, il faudra moins de travail et de temps pour l'y faire entrer qu'avant l'existence du grand tuyau dont il s'agit, et dans lequel sera en partie refoulée l'eau qui autrefois était obligée de passer sous le bateau et le long de ses flancs. Cela rendra désormais sans doute les portes d'amont plus solides et moins coûteuses. On pourra supprimer leurs ventelles.

Ce moyen de faire ouvrir d'elles-mêmes les portes d'amont et de faire entrer de lui-même le bateau dans le bief d'amont, tel que je viens de dire qu'il a été exécuté en Belgique, à l'écluse d'Herbières, est facile à comprendre quand on connaît la disposition précitée du tuyau d'introduction de l'eau dans l'enclave des portes d'aval de l'écluse à colonne liquide oscillante, que j'ai présentée à la Société Philomathique de Paris, le 14 décembre 1844 (voir le journal l'*Institut*, p. 424), et à l'Académie des sciences le 3 avril 1848 (voir-les *Comptes-rendus*, t. XXVI, p. 409). Un extrait du Mémoire inédit où cette écluse est décrite se trouve, avec plus d'étendue que dans les *Comptes-rendus*, dans un Mémoire intitulé : « Résumé succinct des expériences de M. Anatole de Caligny sur une branche nouvelle de l'Hydraulique, » avec figures, publié dans le *Technologiste*, année 1850, chap. III, numéro de juin, p. 501 et 502, et numéro d'août, p. 603 et 604, fig. 14 et 16, p. 8, 9 et 10 des exemplaires tirés à part, distribués en 1850 à tous les membres de l'Académie des sciences de Paris. On va voir que ces idées peuvent avoir d'autres applications assez délicates relativement aux manœuvres du bateau descendant.

M. Maus a exécuté à l'écluse d'Ath, dans l'épaisseur des bajoyers, de longs tuyaux ou aqueducs en maçonnerie ayant chacun 2 mètres carrés de section, ce qui fait environ 4 mètres carrés de section en somme totale, comme pour le tuyau de l'écluse d'Herbières, mais débouchant par une extrémité dans le bief d'aval, et par l'autre dans l'écluse, près des portes d'amont, au lieu de déboucher près des portes d'aval. Son but était de faciliter l'entrée et la sortie des bateaux quand l'écluse était vide.

L'application des principes au moyen de faire ouvrir d'elles-mêmes les portes d'aval et de faire entrer le bateau de lui-même dans le bief d'aval, en vertu de la vitesse acquise dans un tuyau de conduite, exigeait plus de recherches que la manœuvre relative au bateau montant, pour laquelle Il ne

s'agissait que de *laisser agir, sans s'en occuper, le travail rendu disponible par le principe même de l'oscillation, à partir du moment où l'on renoncerait à se servir de la machine pour relever une partie de l'éclusée au bief supérieur.* (Voir la page 603 précitée du *Technologiste.*)

Aussi, quoique M. Maus ait trouvé une propriété très intéressante de la disposition que j'ai dessinée, à la manœuvre du bateau montant à l'écluse d'Herbières, il n'a rien signalé de semblable pour le bateau descendant à l'écluse d'Ath, où les aqueducs de vidange, ayant chacun environ 2 mètres de haut en moyenne sur 1 mètre de large, se trouvent ne pas avoir leur sommet assez au-dessous du niveau du bief d'aval pour que la force vive soit aussi convenablement employée qu'elle pourrait l'être si leur section était plus large et moins haute. Ils sont d'ailleurs étranglés par les bateaux chargés, à cause des endroits où ils débouchent dans l'écluse.

Pour faire baisser le niveau convenablement dans l'écluse au-dessous de celui de l'eau dans le bief d'aval, une bonne disposition de ces tuyaux aurait probablement suffi, en vertu de la vitesse acquise mieux employée de l'eau dans ces tuyaux ou aqueducs de vidange, de manière que les portes d'aval se seraient ouvertes d'elles-mêmes.

Il y a lieu d'espérer que la dénivellation, suffisante pour que ces portes s'ouvrent d'elles-mêmes sous la pression du bief d'aval, sera trop faible pour qu'il en résulte des inconvénients sérieux provenant, soit du mouvement de cette eau quand elle entrera dans l'écluse, soit de ce que, pour empêcher le bateau de toucher le fond de l'écluse, à cause de cette dénivellation, il faudrait en général sans doute approfondir un peu les écluses auxquelles ce système serait appliqué.

Mais il n'est pas aussi facile de prévoir dans tous leurs détails les phénomènes qui se présenteront quand on voudra faire sortir le bateau du sas dans le bief d'aval.

Etudes nouvelles relatives aux manœuvres précédentes.

Depuis la publication de cet ancien mémoire j'ai fait des études nouvelles qui permettent d'être plus affirmatif, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de reproduire ici des considérations secondaires, sur lesquelles, dailleurs, j'aurai occasion de revenir en étudiant un autre appareil.

Quand les portes d'aval seront ouvertes, s'il n'y a pas de bateau dans l'écluse, de grandes ondes, résultant de la dénivellation, iront frapper l'autre extrémité du sas et s'y élèveront au-dessus de l'orifice du tuyau débouchant par hypothèse près du mur de chute. Elles se réfléchiront contre celles qui les suivront. Il en résultera un *clapotis* dont il est difficile de bien prévoir les effets sur la colonne d'eau contenue dans le tuyau de conduite.

Le gonflement provenant de ces phénomènes occasionnera en définitive de l'oscillation en retour parce que le tuyau de conduite ne pourra pas donner passage à la masse d'eau ainsi accumulée à l'extrémité d'amont de l'écluse. On voit, d'après cela, qu'il est difficile de prévoir l'influence de la dénivellation de l'écluse sur un bateau qu'on voudrait faire entrer du bief d'aval dans le sas.

S'il y a un grand bateau dans l'écluse, la vitesse avec laquelle se propageront des ondes d'une extrémité à l'autre dépendra du degré de chargement de ce bateau. S'il est très chargé, l'espace rempli d'eau au-dessous de lui présentera une sorte de tuyau de conduite avec frottement assez notable. Si le bateau est vide, la section de cette espèce de tuyau sera beaucoup plus grande. Dans tous les cas, même en tenant compte des mouvements du bateau, il est facile de voir que l'eau se gonflera très vite sur l'orifice du tuyau de conduite.

Le jeu des tubes mobiles permet de résoudre d'une manière pratique et simple des difficultés relatives aux moyens de faire sortir de lui-même le bateau de l'écluse au bief d'aval, parce qu'on peut interrompre ou rétablir à volonté la communication entre le tuyau de conduite et chacun des deux biefs. Le mouvement des ondes précitées faisant gonfler le liquide à l'*arrière* du bateau sera une première cause pour le faire commencer à sortir de l'écluse. On baissera alors le tube d'aval, d'abord pour que l'eau ne puisse pas continuer à s'écouler de ce côté.

En levant ensuite le tube d'amont, on introduira dans l'écluse, en manœuvrant comme pour une première période de remplissage, une petite quantité d'eau suffisante, comme on sait, quand ce tube sera baissé, pour tirer du bief d'aval un volume d'eau considérable. L'autre tube se lèvera en effet de lui-même comme on l'a expliqué ci-dessus. Il en résultera, *précisément derrière le bateau*, un gonflement qui le poussera sans choc brusque, et qui, étant même, comme on sait, un certain temps à se former, agira avec une sorte de continuité comme sur une espèce de piston pour un grand bateau chargé. Si le bateau est vide, la dénivellation, à son arrière, suffira probablement pour le faire glisser vers l'aval. On sait, d'ailleurs, qu'un bateau vide sort très facilement d'un sas, de sorte qu'on se préoccupe très peu de cette partie de la manœuvre.

Quant à un grand bateau chargé, si une seule période de l'appareil, produite comme pour le remplissage, ne le fait pas sortir de l'écluse, on en produira une seconde; et, dans tous les cas, il est facile de voir comment le tube d'aval doit être manœuvré au besoin pour que la vitesse de l'eau dans le grand tuyau de conduite, au lieu d'être un obstacle quelconque, si l'eau sortait par ce tuyau de l'écluse au bief d'aval, favorise, comme on l'a expliqué ci-dessus, la sortie du bateau.

Il est à peine nécessaire de remarquer, à ce sujet, en quoi

consisteront les mouvements de l'eau dans les deux tubes verticaux, lorsqu'on baissera le tube d'aval pour empêcher l'eau de sortir vers le bief inférieur par le tuyau de conduite. Il est bien entendu que, relativement à cette manœuvre, on n'aura pas à baisser le tube d'aval pour un mouvement de l'eau dans le tuyau de conduite de l'extérieur à l'intérieur de l'écluse.

Pour l'expérience faite en Belgique sur l'ouverture spontanée des portes d'amont, le tuyau de conduite a une section plus grande que ne l'aura ordinairement sans doute celui de mon appareil d'épargne. Cependant le *frein hydraulique*, dont je donnerai plus loin la description, permettra d'employer des tuyaux d'un bien plus grand diamètre qu'on ne l'espérait quand on a construit l'appareil d'épargne à l'écluse de l'Aubois. Mais, abstraction faite de cette nouvelle considération, il sera toujours possible d'empêcher, au besoin, pendant quelques instants les portes d'amont ou d'aval de *commencer* à s'ouvrir, jusqu'à ce que les changements de niveaux de l'eau dans l'écluse suffisent pour qu'elles s'ouvrent assez franchement.

Abstraction faite de son utilité pratique immédiate, la manœuvre dont je viens de parler, pour faire sortir les grands bateaux chargés de l'écluse au bief d'aval, me paraît mériter d'être signalée comme un moyen rationnel d'employer la *pression* de l'eau, au lieu de se servir pour cela, comme on l'a fait sur certains canaux, de la *percussion* de l'eau, qu'on faisait sortir par les ventelles des portes d'amont. Il s'agissait de trouver un moyen de pousser le bateau hors de l'écluse, sans employer une quantité de liquide considérable qu'on tirait *du bief d'amont*, pour les anciennes manœuvres, quand on était pressé. On voit donc déjà que le but de mon système n'est pas seulement d'épargner l'eau, dans le service ordinaire, mais qu'il peut accélérer la manœuvre, en perdant pour cela bien moins d'eau que les moyens connus.

Application faite à l'écluse de l'Aubois.

A l'écluse de l'Aubois, près de Fourchambault, sur le canal latéral à la Loire, l'administration des ponts et chaussées a fait construire mon appareil d'épargne. Je n'étais pas fixé comme aujourd'hui sur les avantages des grandes oscillations initiales et finales. On profita donc de ce que la disposition des lieux le permettait pour donner au tuyau de conduite un assez grand développement. Son axe en arc du cercle partant de l'enclave des portes d'aval, et l'autre extrémité étant le plus près possible des portes d'amont, a une longueur développée d'environ 62 mètres.

Je n'en reproduis pas ici le plan parce que cette disposition n'est pas celle qui doit être généralement adoptée. On en trouvera d'ailleurs les dessins détaillés dans le rapport précité de M. Vallès et surtout dans le tome III, planches XV et XVI du *Cours de navigation intérieure* de M. de Lagrené.

Je crois au reste qu'il sera convenable, sans que cela coûte trop cher, de donner de plus grandes sections au tuyau de conduite et aux diverses parties du système. Les sections des tuyaux sont plus grandes dans le projet dont les dessins se trouvent planche VI.

A l'écluse de l'Aubois un tuyau horizontal en maçonnerie, d'une forme sinon tout à fait semblable du moins analogue à celle des égouts de Paris, offre au passage des eaux une section mouillée sensiblement égale à celle d'un cylindre de $1^m,40$ de diamètre intérieur. Il est placé en entier en contrebas du niveau des eaux du bief d'aval qui surmontent de $1^m,80$ le point le plus bas de sa section mouillée.

Je n'entre pas ici dans le détail de la disposition des tubes mobiles et de leurs sièges; la seule différence essentielle, qui existe entre elle et ce que j'ai décrit plus haut, consiste en ce que le tube d'aval, au lieu de se trouver à l'extrémité du

tuyau de conduite, est posé sur la partie horizontale de ce dernier. C'est le tube d'amont qui est sur cette extrémité ayant au-dessous de lui le seul coude arrondi qui puisse être employé dans ce système. L'eau relevée au bief d'amont se verse par le sommet des deux tubes verticaux mobiles, celui d'aval étant entouré d'une *cheminée* comme on l'a expliqué ci-dessus.

Il résulte de cette disposition générale que les grandes oscillations de l'écluse au bassin d'épargne, ou du bassin d'épargne à l'écluse, se font d'une manière beaucoup plus désavantageuse que si le coude arrondi, ou susceptible de recevoir des lames courbes concentriques, était sous le tube d'aval, comme dans la planche VI. Je préfère pour une autre application cette dernière position du coude arrondi, même dans le cas où la manœuvre ne se ferait pas en partie au moyen d'un bassin d'épargne complètement isolé du bief d'aval.

Si l'on se sert d'une soupape ou porte de flot, comme on l'a expliqué plus haut, pour interrompre alternativement la communication entre la rigole de décharge et le bief inférieur, c'est par l'orifice resté libre à cause de la levée du tube d'aval que passera l'eau des grandes oscillations initiales et finales. Je ne vois qu'un cas où il serait convenable de disposer le coude arrondi sous le tube d'amont, c'est celui dont j'ai parlé ci-dessus, pour lequel les grandes oscillations se feraient dans une rigole, ou grande capacité, en communication avec le bief d'amont.

Dispositions ayant pour but d'accélérer le service

Je reviendrai plus loin sur les études faites à l'écluse de l'Aubois. Les indications précédentes suffisent pour faire comprendre ce que je vais dire relativement aux manœuvres qui permettent d'accélérer le service des écluses de navigation.

Plus le tuyau de conduite est long, plus il y a d'avantages à divers égards dans des limites très étendues, le frottement étant d'ailleurs en général peu important relativement à l'ensemble des autres causes de déchet. Pour une écluse en construction, il est possible de donner à ce tuyau sans beaucoup de frais une grande longueur développée, parce qu'il peut être disposé presque en entier dans les bajoyers. Je suppose qu'une des extrémités débouche dans l'écluse à sa partie d'amont, je veux dire immédiatement en aval du mur de chute, il longera le bajoyer, puis se courbera en aval de l'écluse pour venir rejoindre l'autre bajoyer, le suivre aussi dans toute sa longueur et finir par se détourner en traversant un réservoir en communication avec le bief d'amont, comme dans la planche VI.

Cette disposition offrira beaucoup d'avantages pour faciliter l'entrée et la sortie de tous les grands bateaux chargés. J'ai déjà vérifié de quelle manière à l'écluse de l'Aubois la difficulté de l'entrée et de la sortie de ces bateaux, quand le sas est plein, est diminuée lorsqu'on lève le tube d'amont. Une des portes du sas venant alternativement se poser devant l'orifice de communication du bief d'amont avec le réservoir de la tête de la machine, l'avantage dont il s'agit est moindre que si la disposition des lieux avait permis, comme cela se pourra en général, de placer cet orifice plus en amont de

l'écluse. Cependant je me suis assuré que, même dans ces conditions, on diminuait beaucoup la résistance à l'entrée et à la sortie des grands bateaux chargés. Pour être sûr que les mariniers n'y mettaient pas de complaisance, quand un bateau chargé d'une manière exceptionnelle était en marche, étant engagé entre les portes d'amont, je n'avais qu'à baisser le tube d'amont, pour les contraindre de s'arrêter, à moins de faire beaucoup plus d'efforts.

Le cas ne serait pas tout à fait le même si l'on faisait déboucher le tuyau de conduite immédiatement en aval du mur de chute ou même vers le milieu de l'écluse. L'eau n'arriverait pas directement derrière le bateau quand il commencerait à sortir. Il ne paraît pas que cela soit d'une très grande importance, quant à la résistance dont il s'agit, cependant l'eau serait obligée de se détourner pour arriver derrière le bateau. Mais il est utile que le même tuyau de conduite soit disposé de manière à pouvoir diminuer la résistance, dans le cas où l'écluse est pleine et dans le cas où elle est vide. J'ai d'ailleurs expliqué ci-dessus comment on peut s'en servir pour faire sortir d'eux-mêmes les bateaux du sas au bief inférieur, tout en convenant que, pour faire sortir les bateaux du même sas au bief supérieur, l'action de l'eau s'exercerait d'une manière plus directe si le liquide arrivait immédiatement derrière le bateau dès le commencement de sa sortie. Il y a au-dessous du bateau, quand l'écluse est pleine, une grande épaisseur de liquide, ce qui facilite la flexion du courant venant par le tuyau de conduite pour remplacer la quantité d'eau chassée par le bateau s'il sort de l'écluse. S'il y entre, il peut repousser devant lui par la même voie l'eau qui serait obligée sans cela de passer au-dessous de lui ou autour de ses flancs.

Quand l'écluse est vide, le bateau entrant ou sortant trouve les choses disposées de la manière la plus convenable pour diminuer les résistances du genre de celles dont je viens de parler, si c'est immédiatement en aval du mur de chute que

le tuyau est en communication avec le sas, l'eau n'ayant plus même à se détourner dans l'écluse, comme on vient de l'expliquer. L'avantage de faire déboucher le tuyau de conduite dans l'enclave des portes d'aval consiste surtout en ce que le liquide trouve de la place devant lui avant de passer sous un bateau chargé montant. Mais on peut le faire déboucher à une autre place, en ménageant latéralement une *chambre*, qui produira un effet analogue. Cela augmentera un peu la section réelle de l'écluse, l'épargne est d'ailleurs assez grande pour que cela ait peu d'importance.

J'ai expliqué ci-dessus dans quelles conditions les portes d'aval s'ouvriront d'elles-mêmes à cause de la pression de l'eau du bief inférieur. A l'écluse de l'Aubois, la section du tuyau de conduite n'est pas assez grande pour que les portes d'amont et d'aval s'ouvrent franchement d'elles-mêmes. Quant à celles d'aval, l'une d'elles venant boucher l'orifice du tuyau de conduite, il est clair que la position de cet orifice est désavantageuse relativement à cette ouverture spontanée. D'ailleurs le courant dans l'écluse se dirigeant alors de l'amont à l'aval tend précisément à frapper les portes de manière à s'opposer à leur ouverture. Malgré cela elles se sont ouvertes assez pour permettre d'obtenir facilement l'ouverture complète lorsque, avant qu'on eût posé les engrenages qui y sont aujourd'hui, on s'appuyait contre un levier disposé horizontalement comme pour les anciennes portes.

Une des portes d'amont s'ouvre franchement tout entière quand l'écluse de l'Aubois achève de s'emplir, parce qu'il s'est établi dans le grand tuyau de conduite un courant qui fait d'ailleurs baisser le niveau dans le petit réservoir d'amont. Il faut même prendre des précautions pour que cette porte ne rebondisse pas contre la maçonnerie.

Une partie des avantages dont il s'agit sera évidemment diminuée lorsque le tuyau de conduite débouchera vers la moitié de la longueur du sas. Mais cette dernière disposition a aussi son utilité, même abstraction faite de ce qu'elle four-

nit un moyen d'assurer la tranquillité des bateaux, sans prendre les précautions dont on parlera plus loin.

Il y a des résistances passives provenant du frottement, etc., sous les grands bateaux chargés au commencement surtout de leur ascension, parce qu'en général ils n'ont alors au-dessous d'eux qu'une couche d'eau d'une assez petite épaisseur. Il est intéressant, pour plusieurs raisons, que le courant puisse ainsi *se diviser en deux parties*, l'une se dirigeant vers l'amont, et l'autre vers l'aval, quand un bateau chargé monte.

En général, quand on ne fera pas déboucher le grand tuyau de conduite dans l'enclave des portes d'aval, il semble rationnel de le faire déboucher assez bas, pour qu'on puisse disposer dans la largeur du radier de l'écluse un bout de canal découvert dans le prolongement de la bouche du tuyau. Il n'y aurait point d'arêtes vives à ce canal dont les bords seraient même inclinés et plus ou moins arrondis, de manière à diminuer convenablement la contraction des nappes latérales. L'eau s'écoulant à droite et à gauche sous un grand bateau chargé, trouverait une somme de passages à peu près double de celui qu'elle trouverait si le tuyau débouchait à une des extrémités de l'écluse. Cela diminuerait d'autant plus les pertes de force vive, que l'eau n'aurait plus à traverser toute la longueur du sas.

Des considérations analogues ont bien moins d'importance lorsque l'écluse se vide, du moins si l'on ne transforme pas en bassin d'épargne la rigole de décharge, comme on l'a expliqué ci-dessus. En effet, à la fin de la vidange l'appareil ne fonctionne plus dans cette hypothèse.

Il y a au reste un moyen d'empêcher le mouvement de va-et-vient des bateaux (même sans prendre les précautions précédentes, ni se servir d'un bassin d'épargne, d'où résulte l'emploi de grandes oscillations qui se font avec beaucoup de calme), quand on n'a pas assez de confiance dans l'emploi des cordages de retenue, tels qu'ils sont usités, quoiqu'il

suffise pour les employer de prendre assez de précautions. On s'est longtemps servi au canal du Nivernais de fortes tringles verticales en fer le long desquelles montaient et descendaient des *glissières* qu'on attachait aux bateaux. On a reconnu que cela n'avait aucun inconvénient, et si l'on y a renoncé c'est parce qu'on a trouvé que les cordages étaient plus commodes. Mais si, en définitive, on trouvait qu'il fût utile de s'en servir pour faciliter l'emploi des appareils d'épargne, rien n'empêcherait d'employer ce système de guides.

Les mouvements de va-et-vient du bateau, qu'il s'agit d'éviter, proviennent de ce que, s'il y a beaucoup de périodes, l'eau s'accumule alternativement aux deux extrémités de l'écluse d'une manière assez notable. Or, si le bateau n'est retenu que par des cordages, comme dans le service ordinaire, on conçoit que l'espèce de balancement qui en résulte dans le sens de l'axe de l'écluse peut augmenter avec le nombre des périodes. La tension alternative des cordages a bien un peu d'inconvénient, mais le plus essentiel consiste en ce que la force quelconque qui pousse le bateau dans un sens ou dans l'autre agit le long d'un chemin d'autant plus grand que le cordage est moins court. Il en résulte donc que la quantité de mouvement acquis par le bateau est fonction de la longueur du cordage ayant par conséquent d'autant moins de chance d'être rompu qu'il sera plus court, toutes choses égales d'ailleurs. On voit qu'il y a plusieurs raisons pour lesquelles il est intéressant de pouvoir réduire autant que possible le nombre des périodes, en se servant, quand la disposition des lieux le permet, des grandes oscillations initiales et finales dont j'ai parlé ci-dessus. L'expérience a montré, en effet, que ces grandes oscillations n'agitent pas sensiblement les bateaux qui montent ou descendent assez tranquillement pendant qu'elles se produisent.

A l'écluse de l'Aubois, j'ai essayé de profiter des enclaves, malheureusement trop petites, des échelles métalliques pour disposer des tiges verticales en fer avec anneaux attachés au

bateau et montant ou descendant avec lui. Ces tiges étaient trop faibles à cause du peu de place dont on pouvait se servir pour les poser avec des anneaux provisoires tenant lieu de glissières. Mais on a pu voir combien il était intéressant conformément à ce que j'ai dit ci-dessus, que ces anneaux ou glissières pussent être immédiatement attachés au bateau sans aucune espèce de cordages.

Ces considérations sont particulièrement intéressantes dans les cas où l'on n'emploiera pas un bassin d'épargne, afin de produire les grandes oscillations précitées et dans les cas où le tuyau de conduite déboucherait seulement à l'une des extrémités du sas. Il y a, comme on voit, des raisons pour choisir l'emplacement de la bouche du tuyau vers le milieu de la longueur de l'écluse et il y en a pour le faire déboucher à une extrémité du sas. Il est difficile, avant d'avoir employé successivement les deux systèmes, de faire un choix définitif, chacun ayant ses avantages et pouvant être employé utilement, l'un assurant plus facilement la tranquillité des bateaux, l'autre permettant à divers égards d'accélérer le service. Il était intéressant de les signaler pour bien faire comprendre les principes les plus essentiels de la manœuvre dont il s'agit. Je vais indiquer une autre disposition générale afin de montrer la question sous toutes ses faces.

D'ailleurs dans l'état actuel des choses à l'écluse de l'Aubois, l'emploi d'un bassin d'épargne, qui n'avait pas été construit d'abord, permet de produire les grandes oscillations initiales et finales, en réduisant à trois ou quatre les périodes de remplissage et celles de vidange ; de sorte que les précautions dont on vient de parler ne sont plus nécessaires pour y assurer la tranquillité des bateaux. Mais il est intéressant de montrer comment pourront se faire les manœuvres, lorsqu'il ne sera pas possible de construire un bassin d'épargne ou qu'on ne voudra pas en faire la dépense, quand même on ne diminuerait pas le nombre des périodes en donnant de plus grandes sections au tuyau de conduite.

Dans les divers projets qui ont été faits pour épargner l'eau dans les écluses de navigation au moyen de grands flotteurs, etc., on a généralement proposé d'établir la communication des appareils avec le sas à la moitié de la longueur de celui-ci. C'est une raison de plus pour appeler l'attention, comme l'a fait M. Vallès dans la partie inédite de son dernier rapport, sur les propriétés de la disposition que j'ai proposée pour faire arriver l'eau aussi vers la moitié de la longueur du sas.

Mais, ainsi que je l'ai expliqué ci-dessus, il y a aussi des avantages, quant à la rapidité de la manœuvre, à pouvoir faire déboucher le tuyau de conduite dans la partie d'amont de l'écluse immédiatement en aval du mur de chute. Il y avait d'ailleurs des raisons pour qu'il fût utile de le faire déboucher dans l'enclave des portes d'aval. Or, il y a une disposition qui permet de profiter, du moins jusqu'à un certain point, des avantages résultant de chacune de ces positions de l'embouchure du tuyau de conduite.

On peut faire entrer l'eau dans l'écluse ou l'en faire sortir par les deux extrémités d'amont et d'aval, de manière à modifier utilement les mouvements de va-et-vient des ondes. Il faudra encore tenir compte des effets de la réflexion aux extrémités du sas; mais on conçoit que, les mouvements qui en résulteront étant en sens contraires, cela change l'état de la question quant à la tranquillité du bateau.

Cela serait d'autant plus convenable que, pour une écluse en construction, on pourrait à très peu de frais ménager dans un des bajoyers un grand tuyau de conduite débouchant par ses deux extrémités dans le sas. Perpendiculairement au milieu de sa longueur serait disposé un tuyau de conduite que je suppose d'abord de même diamètre, dont l'autre extrémité irait traverser, d'après les principes exposés ci-dessus, le réservoir établissant la communication entre la tête de la machine et le bief d'amont. Ce tuyau ne serait pas joint au premier par un coude à angle droit brusque, mais par une

bifurcation horizontale à branches convenablement arrondies.

Chacune des extrémités de celui qui déboucherait dans l'écluse n'aurait pas besoin d'être aussi évasée que dans le cas où il n'y aurait qu'un seul débouché dans le sas, parce que la vitesse d'entrée de l'eau dans l'écluse serait sensiblement moitié moindre pour une vitesse donnée que dans le tuyau perpendiculaire précité. Cela donnerait d'ailleurs plus de facilité pour établir les coudes nécessaires au débouché dans l'écluse.

On jouirait d'un avantage analogue à celui qui résulterait d'une section double pour le cas d'une seule embouchure, quand même le diamètre de chacune des deux embouchures ne serait pas plus grand que celui du tuyau. On conçoit que cette disposition rendrait beaucoup moins utile le travail plus difficile et plus coûteux indiqué ci-dessus, pour ménager un bout de canal dans le radier de l'écluse comme une sorte de prolongement du tuyau, et que cela serait même tout à fait inutile pour l'extrémité débouchant dans l'enclave des portes d'aval. Quant à l'extrémité d'amont de l'écluse, si ce bout de canal était très utile, il aurait des dimensions beaucoup moindres que si la section de l'embouchure était plus grande.

Cette disposition générale pourra être utilisée dans la manœuvre indiquée ci-dessus, pour faire sortir de lui-même un bateau descendant au bief inférieur. En effet, l'essentiel pour cela est de pouvoir faire arriver l'eau derrière le bateau dans la partie d'amont de l'écluse. Or, à cette époque, les portes d'aval seront ouvertes, et l'une d'elles viendra précisément boucher l'extrémité du tuyau qui se termine dans son enclave. Il passera bien un peu d'eau de cette extrémité dans l'écluse, mais si cette porte est convenablement accrochée, il n'en passera qu'une petite quantité par rapport à celle qui entrera à l'autre extrémité du sas.

Lorsqu'un grand bateau chargé viendra du bief d'aval dans

l'écluse, en trouvant cette porte sur le même orifice, il cnassera devant lui de l'eau par l'extrémité du tuyau de conduite qui débouchera immédiatement en aval du mur de chute.

Quand l'écluse sera pleine, un grand bateau chargé entrant chassera devant lui de l'eau par l'autre extrémité de l'écluse. La bouche du tuyau près du mur de chute aidera, du moins au commencement, à dégager l'eau qui tend à être refoulée en avant du bateau. Si, au contraire, un grand bateau chargé sort de l'écluse, la disposition du tuyau de conduite sera favorable pour faire rentrer de l'eau derrière lui. Le mouvement de l'eau tendra, il est vrai, peut-être moins à le pousser hors du sas qu'au moyen précité.

J'ai supposé ci-dessus que les deux tuyaux horizontaux évasés en forme de T avaient le même diamètre, afin de faire comprendre plus facilement certains effets. Mais il paraît convenable de donner à celui qui longera l'écluse un diamètre moindre que celui de l'autre, sauf à donner un diamètre au moins aussi grand à ses deux extrémités formant embouchure, car il est bien entendu qu'il sera bon que ces extrémités soient convenablement évasées dans les limites pour lesquelles il n'en résultera aucune difficulté.

Moyens employés à l'écluse de l'Aubois pour amortir les percussions des tubes mobiles sur leurs sièges.

Ainsi que l'a remarqué M. Vallès dans son dernier rapport, les tubes mobiles offrent un moyen d'ouvrir et de fermer de grands orifices avec plus de rapidité que les vannes en usage; il est peut-être plus facile de les construire de manière à garder l'eau convenablement. Mais il fallait trouver des moyens simples pour éviter les percussions de ces grands tubes sur leurs sièges.

Comme il faut que leurs anneaux inférieurs aient l'épaisseur convenable pour garder l'eau en s'appuyant alternativement sur leurs sièges, il faut tenir compte des phénomènes de succion occasionnés par le mouvement de l'eau, quand même on ne se servirait pas de ces phénomènes pour obtenir une marche en partie automatique. Je me suis d'abord servi d'un système de contrepoids étagés, substitués pour chaque balancier à un seul contrepoids. Ils forment une sorte de chapelet, dans lequel les moins pesants sont au-dessus des autres.

Cette disposition a l'avantage de faciliter l'obtention d'une marche automatique. En effet, la force de succion qui ramène alternativement chaque tube sur son siège augmente à mesure que le tube descend. Il est donc plus convenable de commencer par n'avoir à soulever qu'un petit poids, les autres étant successivement soulevés à mesure que la force de succion augmente. Mais, abstraction faite de la marche automatique, on conçoit que le poids le plus lourd étant soulevé le dernier, peut contribuer d'une manière convenable à amortir la percussion du tube sur son siège. Les choses sont d'ailleurs alors disposées de manière qu'à l'époque où le tube devra se soulever, en vertu d'un effort qui agira principalement à l'instant où il quittera son siège, la somme des contrepoids pourra être notablement plus grande que si l'on en avait un seul destiné à produire par sa descente une quantité de travail résistant, égale à celle qui provient de leur soulèvement.

L'inconvénient de ces contrepoids étagés consiste en ce que l'adhérence du tube sur son siège peut être plus ou moins diminuée, précisément par la cause dont je viens de parler, et en ce que, si la marche n'est pas automatique, l'éclusier a un peu plus de peine, selon ce qu'il a dit, à achever le soulèvement du dernier contrepoids ; de sorte que c'est principalement pour la marche automatique qu'on peut recommander l'emploi de cette espèce de chapelet, qui d'ailleurs n'est pas

indispensable pour obtenir cette marche dans les limites où elle est réellement utile.

Je dois appeler bien plus spécialement l'attention sur un nouveau système de freins hydrauliques, au moyen duquel à l'écluse de l'Aubois on a supprimé les inconvénients des percussions précitées, dont on avait d'ailleurs à se défier, même pour une partie de la manœuvre du tube d'aval, quand on n'avait pas à considérer une force de succion. En effet, ce tube à une certaine époque du remplissage de l'écluse, sans être ramené sur son siège par une force de succion, qu'on peut d'ailleurs employer aussi pour cet effet, comme je l'expliquerai plus loin, doit retomber assez vite, de sorte qu'il est prudent d'amortir les percussions dans tous les cas.

On a construit avec succès à l'écluse de l'Aubois les freins hydrauliques sans soupape et à corde ou chaîne alternativement détendue, dont j'ai donné la description dans le compte-rendu de la séance de l'Académie des sciences du 24 février 1879 (Voir planche VI). Il n'a pas été nécessaire, comme je le craignais, d'y ajouter une soupape. Voici quelques détails sur la construction de ce frein dont le mode d'action sera applicable à plusieurs autres appareils, pour lesquels il est intéressant d'avoir un moyen simple de supprimer toute percussion sensible d'un tube retombant alternativement sur son siège et surtout de l'empêcher de rebondir.

Un cylindre vertical en tôle de $0^m,50$ de haut et de $0^m,20$ de diamètre intérieur est attaché par des vis et écrous à une plaque de tôle fixée solidement sur le sol, il est toujours rempli d'eau et contient à son intérieur une pièce mobile formée d'une sorte de tronc de cône en bois, traversé par une tige verticale en fer qui y est attachée par dessous au moyen d'une vis et d'un écrou. La plus petite base est à la partie inférieure. La partie supérieure, dont le diamètre est de $0^m,195$, est cylindrique, sur $0^m,01$ de haut, ce qui suffit pour servir de guide d'une solidité convenable, à l'intérieur de cette espèce de corps de pompe dont le sommet est recouvert

d'une plaque de tôle percée au milieu pour le passage de la tige précitée, qu'elle sert aussi à guider. Cette pièce de bois a $0^{m},20$ de haut; elle n'est pas terminée tout à fait en pointe, puisqu'il faut que sa partie inférieure reçoive, comme je l'ai dit, une vis avec écrou, le tout relié avec une solidité convenable. La partie supérieure avait été un peu creusée pour recevoir au besoin du plomb, mais il n'a pas été nécessaire d'en mettre pour faire retomber d'elle-même cette pièce en temps utile. Il n'est pas indispensable que ce cylindre soit toujours plongé dans l'eau, parce que son couvercle forme une sorte de cuvette. Il en résulte que si la pièce de bois tirée de bas en haut, comme je vais l'expliquer avec plus de détails, dans un cylindre toujours rempli d'eau, fait sortir quelques gouttes autour de la tige en fer qui lui sert à la fois de guide et de lest, elles rentrent d'elles-mêmes dans le cylindre en temps utile; de sorte qu'on n'a à entretenir l'eau à son intérieur que par suite de l'évaporation.

Quand le balancier de chaque grand tube mobile de l'appareil d'épargne de l'écluse de l'Aubois est sur le point d'achever sa course ascendante, une corde attachée au sommet de la tige en fer dont je viens de parler, étant brusquement tendue, soulève la pièce de bois qui y est attachée. Celle-ci éprouve une très grande résistance, l'eau qui est au-dessus d'elle étant obligée de passer au-dessous par l'espace annulaire très étroit qui existe entre cette pièce de bois et le cylindre fixe. Il est bien à remarquer qu'il n'y a aucun choc entre corps solides et que le chemin parcouru par la pièce de bois pouvant au besoin être assez long, pourvu qu'il soit assez petit par rapport à la course totale de l'extrémité du balancier, on peut amortir la percussion pour ainsi dire aussi doucement qu'on le veut. La pièce de bois ayant plus de temps qu'il n'en faut pour retomber d'elle-même jusqu'au fond du cylindre, on pourrait diminuer la section du passage alternatif de l'eau et amortir encore plus complètement la percussion des tubes.

Mais aujourd'hui le *coup de fouet* des longs balanciers de l'appareil d'épargne construit à l'écluse de l'Aubois est entièrement supprimé, *sans que l'on diminue l'adhérence des grands tubes sur leurs sièges quand ils sont venus s'y poser.* Les chocs de ces tubes sur leurs sièges sont tout à fait insignifiants; lorsqu'on ne prenait pas certaines précautions, ils les faisaient autrefois rebondir, de manière à être une cause de déchet, et auraient pu à la longue endommager des maçonneries. L'effet de ces freins ne résultant que du mouvement de l'eau dans un étranglement, il est clair qu'à l'état de repos rien ne s'oppose à l'adhérence des tubes sur leurs sièges, comme le faisait le système précité de contrepoids.

Le principe des freins hydrauliques est connu depuis longtemps; il a été employé d'abord pour amortir les percussions dans les machines à colonne d'eau. Reichenbach est, je crois, le premier qui s'en soit servi en étranglant graduellement des orifices. En 1838, j'ai proposé, dans les *Annales des Mines*, un moyen d'amortir le choc de la soupape d'arrêt d'un bélier hydraulique, en faisant chasser brusquement l'eau d'un vase renversé fixe par le soulèvement d'un vase renversé mobile. Depuis cette époque, ces idées ont été modifiées de diverses manières intéressantes. On sait que la marine emploie des freins hydrauliques qui amortissent des percussions bien autrement considérables que celles dont j'ai eu à m'occuper; mais ces freins exigent l'emploi d'une soupape dont je suis entièrement débarrassé, ce qui établit une différence bien tranchée entre cette nouvelle disposition et ce qui avait été proposé jusqu'à ce jour.

Expériences sur la marche automatique partielle.

Pour la vidange de l'écluse, on peut ne se servir que du tube d'aval. Dans les premières périodes, la marche automatique, telle qu'elle a été essayée à l'écluse de l'Aubois, serait si désavantageuse qu'il n'y pas à s'en occuper. Les oscillations en retour ne redescendent assez bien pour produire cet effet que si l'eau est suffisamment baissée dans le sas. Or il y a, comme on l'expliquera plus loin, un grand désavantage à obtenir cette baisse dans les premières périodes, du moins quand le tuyau de conduite n'a pas une section plus grande qu'à cette écluse. Mais pour les dernières, les conditions sont très différentes, à partir de l'époque où l'oscillation en retour descend assez bas pour que le tube d'aval se relève de lui-même, en vertu d'un contrepoids, ou des contrepoids étagés dont j'ai parlé ci-dessus.

Quand l'eau ne presse plus assez l'anneau intérieur disposé à l'extrémité inférieure de ce tube, dont on peut voir le détail planche VI, celui-ci se lève franchement et l'eau de l'écluse s'écoule au bief d'aval. Il monte un peu d'eau dans ce tube au-dessus du niveau de ce bief, à cause de la percussion de la nappe liquide annulaire qui sort au-dessous de lui et la pression qui en résulte sur l'anneau dont il s'agit est une première cause qui tend à le faire redescendre. Il se produit bientôt un phénomène de succion sur lequel j'ai donné des détails dans la première partie de cet ouvrage, p. 318, 356, etc. Ce tube est ramené sur son siège, en soulevant les contrepoids précités.

La nappe annulaire se relève. Mais ne rencontrant que du liquide devant elle, il n'en résulte pas de coup de bélier, comme si la section transversale était bouchée. Pour mieux

s'en assurer, dans les expériences antérieures précitées faites aux bassins de Chaillot, au moyen d'un vieux tuyau en tôle de rebut de un mètre de diamètre intérieur, on pria M. Loyal, conducteur des ponts et chaussées, de descendre sur l'extrémité de ce tuyau, près de la tête de la machine, avant qu'on eût mis de l'eau dans le bassin simulant le bief d'aval. Il dit, pendant la marche de l'appareil, qu'il n'y avait que des ébranlements sans importance, et ils pouvaient d'ailleurs venir de la percussion du tube qu'on ne savait pas alors amortir comme aujourd'hui par les freins hydrauliques précités.

J'ai déjà dit qu'à Chaillot la marche automatique des dernières périodes de vidange avait été obtenue avec avantage. A l'écluse de l'Aubois on l'obtient aussi quand on veut, même après les deux ou trois premières périodes, quand il y en a sept. Mais les premières sont les plus importantes et l'on a reconnu qu'il pouvait y en avoir un assez petit nombre, pour qu'on n'eût pas à s'occuper sérieusement de cette marche automatique, qui n'est plus guère d'après cela qu'un objet de curiosité. Cependant les forces qui tendent à ramener le tube sur son siège peuvent être au moins considérées comme fournissant un indice utile pour avertir l'éclusier de l'instant où il doit baisser ce tube, si ce dernier ne descend pas assez complètement de lui-même. Pour un petit nombre de périodes, surtout quand on veut rendre automatique la seconde ou la troisième, le rendement paraît un peu diminué par ce genre de manœuvre.

Pour le remplissage de l'écluse, le tube d'amont se baisse de lui-même, en vertu d'un phénomène de succion moins nouveau, analogue à celui qui fait enfoncer les poutrelles dans les barrages.

L'eau descend alors dans les deux tubes verticaux jusqu'à ce que le niveau soit assez bas dans le tube d'aval, pour que celui-ci se lève de lui-même, comme je viens d'expliquer qu'il le fait dans les dernières périodes de vidange. A cette époque, le tube d'amont est au contraire tenu appliqué sur son siège,

parce qu'il porte à son extrémité inférieure un anneau disposé extérieurement, comme on en voit le détail planche VI, et qui est pressé de haut en bas par l'eau en communication avec le bief d'amont. La colonne liquide contenue dans le grand tuyau de conduite, étant en mouvement vers l'écluse, tend à faire baisser le niveau sous le tube d'aval. Mais celui-ci étant levé, l'eau de la rigole de communication avec le bief d'aval entre à la suite de celle qui s'écoule et dans laquelle l'air n'a pas eu le temps de s'introduire, ce qui est un résultat essentiel.

Quand le mouvement acquis dans le grand tuyau de conduite est éteint, on baisse le tube d'aval, et il se produit une oscillation en retour de bas en haut, dans les deux tubes. Après les premières périodes, lorsque l'eau est à une hauteur suffisante dans l'écluse, pour que les oscillations en retour remontent à une hauteur convenable, l'anneau inférieur du tube d'amont est pressé de bas en haut avec assez de force pour que le tube d'amont se relève de lui-même, en vertu de son système de contrepoids. A partir de cette époque, la marche de ce tube est entièrement automatique.

Quant au tube d'aval, il paraît difficile, pendant le remplissage du sas, de le rendre automatique d'une manière avantageuse, au moyen des phénomènes de succion précités, lorsque le tube d'amont fonctionne de lui-même. Cependant comme on pourra sans doute plus tard utiliser des principes encore peu connus, il n'est peut-être pas sans quelque utilité de faire remarquer que cet effet a été obtenu, même avec régularité, quand l'eau était montée dans l'écluse à une hauteur telle que la marche automatique devenait sans importance. On pouvait même obtenir plus tôt cette marche, lorsque la levée du tube d'aval était très petite. Mais je ne fais qu'indiquer sommairement ce détail qui, dans l'état actuel des choses, ne peut être appliqué avec avantage. Il y aura sans doute lieu d'y revenir plus tard, du moins quand on saura mieux quelle est, dans chaque circonstance, la lon

gueur du tuyau de conduite dont on peut se contenter. En effet, la force de succion que je vais rappeler dépend de la vitesse de l'eau, et pour une quantité donnée d'eau descendue, la vitesse dépend de la longueur de la colonne liquide que cette descente met en mouvement.

Lorsque la vitesse de rentrée de l'eau dans l'écluse était éteinte, il revenait une certaine quantité d'eau en arrière, et cela occasionnait sous le tube d'aval le phénomène de succion précité dont on se sert pendant la vidange du sas pour ramener ce tube sur son siège. Il redescend, en effet, de lui-même, l'oscillation en retour fait lever le tube d'amont, comme je l'ai expliqué, et les deux tubes fonctionnent successivement d'eux-mêmes. Ce résultat secondaire, bien constaté d'ailleurs, a paru assez curieux.

Quand on se sert d'un bassin d'épargne, comme je l'ai indiqué plus haut, la marche automatique du tube d'amont devient plus intéressante pour la pratique, parce que l'éclusier n'a plus du tout à s'occuper de le faire marcher. La grande oscillation initiale de remplissage élève en général l'eau dans l'écluse, assez haut pour que le tube d'amont fonctionne entièrement de lui-même.

Dans les premières expériences à l'écluse de l'Aubois, le bassin d'épargne avait une section beaucoup plus grande que celle du sas, et ses parois ne s'élevaient qu'à une petite hauteur, suffisante pour utiliser l'oscillation de décharge, quand il restait assez peu d'eau dans l'écluse au-dessus du bief d'aval. Aujourd'hui, la section moyenne de ce bassin est réduite à environ les deux tiers de celle du sas, elle pourrait être encore moindre, sa hauteur est considérablement augmentée. Il en résulte qu'après la grande oscillation initiale de remplissage, trois ou quatre périodes entièrement automatiques du tube d'amont suffisent pour vider le bassin d'épargne notablement au-dessous du niveau du bief d'aval.

Lorsqu'on emploie la marche automatique du tube d'aval pendant la vidange, ou celle du tube d'amont pendant le

remplissage du sas, ces tubes restent levés d'eux-mêmes en temps utile, soit pour que l'écluse achève de se vider, soit pour qu'elle achève de se remplir. Les choses peuvent, en effet, être disposées de manière que les forces de succion, dépendant de la différence des niveaux, qui tendent à faire baisser le tube d'amont pendant le remplissage ou celui d'aval pendant la vidange, ne soient plus assez puissantes pour le faire redescendre, à partir de l'époque où il est utile qu'il reste levé.

C'est surtout quant au tube d'aval pendant la vidange, comme on n'a pas à s'occuper de celui d'amont, que cette considération n'est pas sans quelque utilité pratique. En effet, si la marche automatique des dernières périodes n'a pas beaucoup d'importance, elle peut cependant permettre à l'éclusier de s'éloigner de l'appareil pour aller s'occuper des autres manœuvres que peut exiger le passage d'un bateau, dans le cas où, à cause de la disposition des lieux, on renonce à employer toute espèce de bassin d'épargne,

Lorsque l'écluse est remplie, le tube d'amont restant levé, il est intéressant de montrer, quoique cela ne soit pas très important pour la pratique, comment on peut le faire descendre de lui-même. Or, si, pour vider l'écluse, on lève le tube d'aval, les deux tubes verticaux laissent tomber l'eau qu'ils contiennent, à cause de la résistance résultant de l'inertie de la colonne liquide du grand tuyau de conduite. L'eau descendue ainsi du tube d'amont, ne pressant plus de bas en haut l'anneau inférieur de ce dernier, et l'eau en communication avec le bief supérieur, le pressant de haut en bas, il redescend de lui-même sur son siège. Sa descente est aidée sans doute par un effet de succion, résultant de ce qu'il passe une quantité d'eau quelconque de l'extérieur à l'intérieur pendant la baisse de l'eau dont je viens de parler. Mais à l'écluse de l'Aubois, quand j'ai fait cette expérience, il n'a pas été possible de voir si la petite quantité d'eau occasionnant cette succion a contribué beaucoup à faire descendre ce tube.

Quand on produit la grande oscillation initiale de remplissage, si le tube d'aval est baissé en temps utile, le mouvement acquis de l'eau dans le grand tuyau de conduite fait descendre l'eau des tubes verticaux assez notablement au-dessous du niveau de l'eau dans l'écluse, pour qu'il y ait ensuite une forte oscillation en retour, faisant monter le liquide dans ces tubes verticaux. Il en résulte que celui d'amont se lève de lui-même et que sa marche est entièrement automatique, jusqu'à ce qu'il reste levé, comme j'ai expliqué ci-dessus que cela doit se faire.

Si les détails précédents n'ont pas encore une grande importance pratique, il est au moins intéressant d'en signaler les principes, d'autant plus que l'emploi des nouveaux freins hydrauliques permettra de donner aux tuyaux de beaucoup plus grandes sections.

Quand la vitesse s'éteint dans le grand tuyau de conduite à l'époque du remplissage de l'écluse, et même un peu auparavant, on en est averti par une espèce particulière d'ondes décrites dans la première partie de cet ouvrage, p. 317. Leur vitesse *apparente* est très commode pour avertir au besoin l'éclusier de l'instant où il doit baisser le tube d'aval. La sonnette automatique, dont je vais donner la description, l'avertit d'ailleurs aussi convenablement.

La fin des grandes oscillations initiales et finales est indiquée par une sonnette automatique dont le mécanisme très simple repose sur le jeu de deux tiges articulées. L'une d'elles verticale est posée dans le bassin d'épargne, devant l'orifice de communication entre ce bassin et la chambre du tube d'aval. Elle a la liberté de tourner convenablement autour d'un axe supporté par le mur de séparation de ce bassin et de cette chambre.

Si l'eau sort de l'écluse, elle repousse la tige verticale dont il s'agit, parce que celle-ci porte à sa partie inférieure une palette, d'ailleurs suffisamment lestée, pour que cette tige reste verticale dans l'état de repos stable, et soit ramenée

vers cette position quand le mouvement qui l'en avait écartée n'existe plus. Si au contraire l'eau du bassin d'épargne entre dans l'écluse, le bas de la tige verticale se rapproche du mur, et quand le mouvement de l'eau du bassin d'épargne vers le tube d'aval cesse, cette tige tend à revenir dans la position verticale.

L'autre tige à peu près horizontale, avec laquelle elle est articulée, fait fonctionner en temps utile un taquet qui agit sur une sonnette, pour avertir de la fin de l'oscillation, se dirigeant soit dans un sens, soit dans l'autre. Il est à remarquer que la première tige, en vertu de son lest, tend à redevenir verticale, même un peu avant la cessation du mouvement, ce qui est convenable pour mieux assurer la manœuvre.

Cette sonnette automatique n'est établie à l'écluse de l'Aubois que d'une manière très provisoire, mais suffisante pour montrer la précision avec laquelle l'éclusier peut être averti s'il n'est pas bien formé. Il est à remarquer qu'elle peut être utile aussi pour indiquer, même pendant la nuit et avec autant de sûreté que les ondes précitées l'indiquent pendant le jour, l'instant où il est convenable de baisser le tube d'aval à l'époque du remplissage de l'écluse.

Pendant le remplissage du sas, on a rendu entièrement automatique le tube d'aval de la manière suivante, quand on renonçait à faire fonctionner de lui-même le tube d'amont. Je suppose l'écluse au niveau du bief d'aval et le tube d'aval levé. Pour le faire baisser de lui-même, il suffit de lever le tube d'amont; une *bouffée* d'eau d'amont se précipite sous le tube d'aval et occasionne un effet de succion qui fait baisser ce tube de lui-même. Cette quantité d'eau perdue au bief d'aval n'est pas très grande parce que, les deux tubes verticaux étant très près l'un de l'autre, l'inertie de la colonne d'eau qui est entre eux n'empêche pas une petite quantité d'eau tombée d'amont d'acquérir une assez grande vitesse.

Le liquide remplit les deux tubes et coule dans l'écluse, jusqu'à ce qu'on baisse le tube d'amont, alors l'eau descend

dans ces tubes, et celui d'aval se lève de lui-même en temps utile, comme on l'a expliqué pour la marche ordinaire. Quand le mouvement est éteint dans le grand tuyau de conduite, on lève le tube d'amont, et l'on recommence ce que je viens de dire.

On a remarqué que la manœuvre du tube d'aval, quand elle était faite de cette manière, exigeant que le tube d'amont ne fût pas automatique, rendait assez fatigant le soulèvement alternatif de ce dernier. Mais si, quant à présent, on renonce à cette marche automatique du tube d'aval, pendant le remplissage, il est intéressant de signaler des principes qu'on pourra peut-être appliquer ultérieurement.

On augmente beaucoup la force de succion à contre-courant, qui résulte du mouvement de l'eau sous le tube d'aval convenablement levé, en entourant l'extrémité inférieure de ce tube d'une collerette à bords relevés extérieurement. J'en ai déjà parlé dans la première partie, et je reviendrai sur ce sujet à l'occasion d'un autre appareil. Au moyen d'une collerette semblable, on peut aussi augmenter beaucoup la force de succion, résultant du mouvement de l'eau, quand on soulève le tube d'amont.

Il y a lieu d'espérer que, sachant aujourd'hui amortir les percussions des tubes mobiles sur leurs sièges, on pourra profiter de ces collerettes pour obtenir une marche automatique. Mais on les a provisoirement supprimées à l'écluse de l'Aubois, à cause des efforts que cela faisait faire, pour lever les tubes dans les premières périodes, ainsi que des percussions qui en résultaient sur les sièges et dont on sait d'ailleurs se débarrasser aujourd'hui.

Les principes sur lesquels repose la marche en partie automatique décrite ci-dessus ont d'ailleurs un avantage pratique essentiel, en ce qu'ils donnent des moyens d'assurer le degré de précision avec lequel l'éclusier doit agir, pour obtenir le rendement maximum. L'expérience a montré au reste qu'il est très facile de prendre l'habitude de faire les divers

mouvements en temps convenable. Il y a plusieurs phénomènes qui avertissent l'éclusier. Ainsi quand même la force de succion ne suffirait pas pour faire retomber franchement le tube d'aval pendant la vidange de l'écluse, et quand même elle ne donnerait pas une indication suffisante par l'effort qui serait nécessaire pour l'empêcher de commencer à retomber, l'éclusier serait averti par un bruit augmentant de plus en plus jusqu'à l'instant où il doit baisser ce tube. Ce bruit est occasionné par le mouvement de l'eau qui sort entre le tube d'aval et son siège. Quant au moment où il faut baisser le tube d'aval pendant le remplissage on s'est d'abord servi, pour former un ouvrier, de l'état de calme qui s'établit au fond du tube d'aval, mais on a maintenant d'autres indices dont j'ai parlé ci-dessus.

Si l'on tenait à une marche entièrement automatique, il serait facile de l'obtenir au moyen d'un système de cataracte, dont le seul inconvénient, sans doute, serait de compliquer un peu l'appareil. Je reviendrai ultérieurement sur ce détail. Il n'est pas nécessaire de faire manœuvrer le tube d'amont pendant la vidange de l'écluse. Mais on peut le soulever alternativement pour que l'eau rentre au bief supérieur, au-dessous de ce tuyau, par un assez grand orifice, au lieu de verser par les sommets des deux tubes verticaux. Par ce moyen, on peut éviter de faire remonter l'eau plus haut que cela n'est nécessaire, et il en résulte que le niveau du bassin d'amont pourrait varier dans des limites très étendues, sans que cela diminuât le rendement. Or, c'est ce qui aurait lieu, si l'on était obligé, à cause de ces variations, de faire verser l'eau beaucoup plus haut que pour l'état normal du niveau de ce bief. Ainsi, il ne serait pas nécessaire, comme on pourrait le croire, de pouvoir varier, au moyen d'une vanne cylindrique, la hauteur du tube d'amont, pour obvier à cet inconvénient.

On conçoit d'ailleurs que l'obligation de faire fonctionner ce tube pendant la vidange de l'écluse compliquerait un peu

la manœuvre, tandis qu'il est bien plus simple de n'avoir à s'occuper que du tube d'aval. Mais il est utile de donner des indications, sur la manière de faire les manœuvres, pour toutes les circonstances exceptionnelles qui peuvent se présenter.

On comprendra mieux maintenant ce que j'ai indiqué plus haut, relativement aux écluses accolées doubles. Pour une manœuvre particulière le niveau était supposé baissé dans le réservoir de communication, entre la tête de la machine et le bief d'amont. Or, il serait utile, pour en profiter quand on videra celle des deux écluses qui est la moins haute, de relever l'eau en la faisant passer sous le tube d'amont, tant que le niveau ne sera pas remonté dans le réservoir dont il s'agit aussi haut que l'eau du bief supérieur. Je dois dire que je compte peu sur les avantages pratiques pouvant résulter de la manœuvre particulière, résultant de la baisse alternative, qui peut ainsi être produite dans ce réservoir. Mais il est d'autant plus intéressant de présenter la question sous toutes ses faces, qu'il s'agit d'appliquer des phénomènes, entièrement nouveaux, que l'usage apprendra, sans doute, à employer d'une manière plus pratique.

On a fait à l'écluse de l'Aubois quelques essais d'une manœuvre assez curieuse, à laquelle il est à regretter que je n'aie pas pensé à l'époque où il y avait encore autour des extrémités inférieures des tubes mobiles des collerettes dont j'ai parlé ci-dessus. Il est vrai qu'à cette époque on ne savait pas encore amortir comme aujourd'hui les percussions des tubes sur leurs sièges; or, ces collerettes augmentaient beaucoup ces percussions. J'ai retrouvé une note sur les expériences suivantes, depuis que ce qui précède est imprimé.

Après avoir équilibré le tube d'amont, de manière qu'il remonte de lui-même quand il est rempli d'eau, on lève celui d'aval qui retombe ensuite de lui-même, en temps utile, comme je l'ai expliqué ci-dessus. L'eau monte dans les deux tubes, celui d'amont se lève et l'eau rentre au bief supérieur

en passant principalement au-dessous de lui. On conçoit que, si l'eau est assez descendue à la fin de la période, il retombe de lui-même, en vertu de la succion résultant de ce qu'il revient de l'eau d'une certaine hauteur du bief supérieur dans l'écluse. Quand il est posé sur son siège, l'eau baisse dans les deux tubes verticaux, plus qu'elle ne ferait s'il n'y avait pas eu de force vive engendrée dans le tuyau de conduite par la descente du liquide revenant ainsi du bief d'amont.

Si donc le tube d'aval est vidé suffisamment pour être relevé par son contre-poids, comme je l'ai expliqué ci-dessus, la marche de l'appareil peut devenir entièrement automatique, pendant tout le temps de la vidange, jusqu'à ce que le tube d'aval reste levé comme on a expliqué, relativement à d'autres manœuvres, que cela doit se faire.

Il paraît que ce moyen d'obtenir une marche automatique, faisant redescendre dans l'écluse une partie de l'eau relevée, n'est pas avantageux pour le rendement, d'autant plus qu'il faut, pour en profiter dans les premières périodes, qu'elles fassent alors baisser l'eau dans l'écluse, plus que pour les manœuvres ordinaires.

On a vu plus haut qu'à l'époque du remplissage on pouvait aussi se servir, pour produire une force de succion, du retour d'une partie de l'eau relevée dans l'écluse. Cette manœuvre offre donc un inconvénient du même genre. Aussi je n'entre dans ces détails que parce qu'ils ont conduit à des résultats bien originaux. Dans l'application de principes encore si peu connus, il est intéressant de ne rien omettre, ne connaissant pas le degré d'utilité que des combinaisons aussi nouvelles pourront avoir dans l'avenir, surtout, comme je l'ai dit pour les manœuvres de remplissage, quand on sera plus complètement fixé sur la longueur dont on peut se contenter pour le tuyau de conduite.

Expériences sur diverses manœuvres faites à l'écluse de l'Aubois.

Quand on vide l'écluse, à cause de la pression de haut en bas sur l'anneau inférieur du tube d'aval, il faut d'abord faire un effort assez considérable ; mais il est à remarquer que c'est seulement le *long d'un chemin très court*. Dès l'instant où ce tube est un peu soulevé, on voit *s'écraser* la colonne d'eau qu'il contient, de sorte que la pression exercée de haut en bas sur cet anneau diminue très vite.

On conçoit d'après cela que, pour manœuvrer l'appareil avec le moins d'effort possible, il faut un certain apprentissage qui n'offre d'ailleurs aucune difficulté. Il faut tenir compte pour cet apprentissage de ce qu'à l'instant où le tube commence à se soulever il s'échappe de l'eau avec une certaine vitesse entre l'anneau inférieur de ce tube et son siège, de sorte qu'il est convenable que le premier effort soit fait le plus franchement possible à cause du phénomène de succion.

Une remarque semblable doit être faite pour le tube d'amont. Je suppose qu'on se serve du bassin d'épargne seulement comme d'une rigole de décharge.

Quand on soulève le tube d'amont la longue colonne liquide du tuyau de conduite résiste par son inertie et l'eau montant très vite dans les deux tubes verticaux, la pression de bas en haut sur l'anneau extérieur du tube d'amont augmente rapidement. Il est vrai qu'au premier instant, il se produit un effet de succion très puissant sous cet anneau, à cause de la vitesse du liquide. Mais l'expérience a appris, comme pour le tube d'aval pendant la vidange, qu'on diminue beaucoup le travail nécessaire pour lever le tube

d'amont pendant le remplissage, en faisant d'abord un premier effort le plus franchement possible, parce que l'eau en montant agit au-dessous de l'anneau de ce dernier tube.

Dans l'un et l'autre cas, après ce premier effort, le tube achève de se lever de lui-même en vertu du contrepoids de son balancier. Il y a, comme on voit, un petit apprentissage à faire pour l'un et l'autre tube. Mais, dans l'état actuel des choses, on peut se dispenser de soulever avec la main le tube d'amont, quand on se sert du bassin d'épargne à sections réduites, comme je l'ai expliqué ci-dessus. La marche automatique de ce tube, à partir de cette levée, ne paraît pas diminuer le rendement, quand l'appareil est en assez bon état pour qu'il n'y ait pas de cause d'arrêt. Cependant on l'a essayée jusqu'à présent seulement pour des levées de ce tube moindres qu'elles ne peuvent l'être quand il ne fonctionne pas de lui-même.

Voici, au reste, quelques détails sur la manœuvre, pour les cas où il n'y aura pas de bassin d'épargne. On lève une première fois le tube d'amont, et on le laisse se baisser lui-même. Le tube d'aval se lève de lui-même par suite de la baisse de l'eau à son intérieur, comme on l'a expliqué ci-dessus, et comme cela est expliqué dans le dernier rapport de M. Vallès, puis on baisse le tube d'aval en temps utile. Mais je dois ajouter que, dans tous les cas, il a été trouvé provisoirement utile, pour les premières périodes à l'écluse de l'Aubois, qu'une corde attachée au balancier porte à son extrémité inférieure un anneau qu'à chaque période on accroche à une cheville. Cette corde est d'ailleurs celle dont on se sert pour faire retomber le tube d'aval sur son siège.

On a tout le temps, même dans l'état actuel des choses, d'aller du balancier du tube d'aval au balancier du tube d'amont, pour lever celui-ci en temps utile, jusqu'à ce qu'il se lève de lui-même. Cela sera encore bien plus facile quand on aura rapproché les extrémités de ces balanciers, comme je l'ai proposé pour les autres applications; à partir de l'ins-

tant où il se lève de lui-même, son mouvement automatique est établi, et l'on n'a plus à s'en occuper.

Quant au tube d'aval pour les premières périodes de remplissage, il faut avoir soin de détacher l'anneau dont je viens de parler, afin que ce tube se lève de lui-même. On n'a, au reste, à s'occuper de ce décrochement que dans les premières périodes. Pour les dernières, il n'est pas nécessaire d'accrocher ainsi le tube d'aval à cause des pressions résultant des oscillations remontantes. Cette manœuvre, relative à une opération d'ailleurs secondaire, dont on peut se passer sans beaucoup d'inconvénient, peut être simplifiée d'une manière intéressante, quoique je ne la conseille pas encore pour la pratique.

Il suffit, en effet, afin de faire retomber le tube d'aval sur son siège, de lever le tube d'amont, ainsi que je l'ai expliqué ci-dessus, pour le cas où l'on veut obtenir une marche entièrement automatique du tube d'aval pendant le remplissage, ce qui a d'ailleurs, comme je l'ai dit, l'inconvénient d'exiger un certain effort. Alors, il n'est pas du tout nécessaire d'accrocher le tube d'aval.

Je dois dire que cette simplification dans la manœuvre diminue un peu le rendement des premières périodes, parce que d'abord il faut tenir compte de la *bouffée* d'eau qui tombe dans le bassin d'épargne pour opérer cette succion, puis de ce que les tubes verticaux sont ensuite remplis en entier, par de l'eau tombant du bief d'amont, d'une hauteur moyenne égale à la moitié de la chute de l'écluse, tandis que dans l'autre manœuvre, on profite, pour les remplir, de l'oscillation ascendante en retour.

Quand on veut commencer un premier remplissage en tirant de l'eau du bassin d'épargne à sections réduites, l'eau y étant d'abord au niveau du bief d'aval, ce bassin doit avoir assez de profondeur. Il faut, en effet, qu'on ne le vide pas en entier (comme cela arrive en ce moment à l'écluse de l'Aubois, lorsqu'on fait cette manœuvre particulière), bien avant

qu'on ait retiré du bassin d'épargne tout ce qu'on pourrait en retirer s'il était plus profond. C'est surtout quand on fait un premier remplissage, qu'on s'aperçoit qu'il aurait été à désirer que la chambre du tube d'aval communiquât avec le bassin d'épargne par un passage plus large.

Dans l'état actuel des choses à cette écluse, on voit la surface de l'eau s'infléchir dans ce passage, en général pour les manœuvres de remplissage ; de sorte que l'eau à épuiser par l'appareil est réellement à une profondeur plus grande que cela ne serait nécessaire, si le passage dont il s'agit avait des dimensions plus considérables, soit qu'il y ait un bassin d'épargne, soit qu'on se serve d'une rigole de décharge.

Pour les premiers essais, il avait été prudent de réduire les dimensions de ce passage, afin d'augmenter la solidité de la chambre du tube d'aval, parce qu'on ne savait pas comme aujourd'hui modérer les percussions de ce tube sur son siège.

On a pris des précautions dont on n'aura plus à s'occuper pour des applications ultérieures. On avait d'ailleurs à varier les expériences sur des phénomènes nouveaux, dont on ne connaissait pas bien la puissance.

Quoique le coude arrondi ne soit pas sous le tube d'amont, comme il serait utile que cela fût pour les grandes oscillations initiales et finales, j'ai fait quelques expériences sur une manœuvre pour laquelle, pendant le remplissage de l'écluse, *on ne lève pas du tout le tube d'amont* qu'on ne lève pas non plus pour la vidange. Le tube d'aval fonctionne au commencement de la vidange, comme je l'ai expliqué ci-dessus, pour un bassin d'épargne, avant la grande oscillation finale de décharge. La seule différence consiste en ce que, au lieu d'achever de vider ce bassin, quand on remplit l'écluse au moyen des périodes de l'appareil, on se contente de produire une grande oscillation initiale de remplissage, puis on lève les ventelles de la porte d'amont. Dans l'état actuel des choses, les sections du bassin d'épargne sont encore un peu trop grandes pour que le niveau de l'eau y redescende jusqu'à

celui du bief d'aval par cette grande oscillation, sans doute parce que le coude arrondi n'est pas sous le tube d'aval. Cependant les différences de ces niveaux ne sont pas assez grandes pour empêcher d'obtenir un rendement qui, bien que diminué dans cette manœuvre simplifiée, n'est cependant pas sans importance. Je reviendrai ultérieurement sur ce détail. J'estime que, pour le remplissage du sas, on doit épargner environ un huitième de l'éclusée de plus, quand on emploie le jeu des deux tubes, au lieu de se contenter de cette manœuvre. Elle permettrait au besoin de supprimer toute chance de filtration par le tube d'amont qui pourrait être fixé d'une manière définitive; mais il faudrait conserver les ventelles des portes d'amont. Or, il y a lieu d'espérer qu'il vaudra mieux pouvoir supprimer les ventelles ou les calfater de manière à ne s'en servir que dans des circonstances exceptionnelles.

Expériences sur les deux tubes conduits l'un par l'autre.

Je vais donner la description d'une manœuvre qui peut aussi avoir ses avantages et a été même remarquée particulièrement par un ingénieur des ponts et chaussées. Les deux tubes sont alors conduits l'un par l'autre. Pour cette manœuvre, on renoncerait à se servir d'un bassin d'épargne.

J'ai fai lever le tube d'aval. Une corde attachée à son balancier et passée sous une poulie fixe attachée à un pieu enfoncé au-dessous de lui dans le sol, passait ensuite sous une autre poulie fixe attachée à un pieu enfoncé dans le sol sous le balancier d'amont. L'autre extrémité de cette corde a été attachée à ce dernier balancier, de manière que les deux balanciers ont pu agir l'un sur l'autre. On a modifié les contrepoids, de manière que chaque tube serait toujours de lui-

même retombé sur son siège, si la corde passant sous ces deux poulies fixes n'avait pas existé. Il en est résulté que lorsqu'on a levé un des deux tubes, l'autre est retombé de lui-même en tenant cette corde tendue.

Quand on lève le tube d'amont, le tube d'aval redescend ainsi de lui-même. Il se présente alors un effet intéressant, dont j'ai fait répéter l'observation par M. Meunier, garde du canal. Quoique la colonne liquide contenue entre les deux tubes mobiles n'ait qu'une petite longueur développée, cette longueur est suffisante pour résister par son inertie à l'eau d'amont, qui se précipite en bouillonnant dans le tube d'amont, de manière qu'on a le temps de laisser baisser le tube d'aval complètement avant qu'une *bouffée* d'eau sensible soit passée au-dessous de lui au niveau d'aval. Il en a été du moins ainsi quand le tube d'aval n'a été levé qu'à la moitié environ de la hauteur de sa plus grande course qui était de $0^{m},71$. On n'apercevait même alors aucune bouffée d'eau en aval.

Quand on a répété l'expérience avec une levée complète de ce tube, M. Meunier a remarqué le passage au bief d'aval d'une *bouffée d'eau*, d'ailleurs très petite par rapport à celle qu'il avait observée pendant la marche automatique du tube d'aval, en remarquant surtout l'effet de la première période. Je ferai observer au reste que l'apparition de cette très petite quantité d'eau n'aurait peut-être même pas eu lieu, si la poulie fixe, disposée au-dessous du balancier d'amont, avait été mise où elle aurait dû être, immédiatement au-dessous de ce balancier, au lieu d'être alors beaucoup trop à gauche, ce qui faisait tirer la corde d'une manière désavantageuse. Je ferai remarquer aussi que, dans le cas où l'on ferait conduire les deux tubes l'un par l'autre, il vaudrait beaucoup mieux le faire au *moyen d'un balancier intermédiaire* et supprimer les deux balanciers existants.

Mais je me propose seulement de rendre compte de l'essai provisoire fait au moyen de ce qui existait à l'écluse de l'Au-

bois. Le même homme a fait fonctionner l'appareil à lui seul pour le remplissage et pour la vidange de l'écluse ; il a eu cependant plus de peine que pour les manœuvres précitées ; mais cela doit provenir en partie de ce qu'une des poulies était mal posée, ou même de ce qu'on employait des poulies fixes au lieu d'un balancier intermédiaire pour faire conduire les deux tubes l'un par l'autre.

Il est au reste bien évident que, si les diamètres des tubes mobiles étaient les mêmes que ceux des arêtes inférieures de leurs anneaux, ce qui n'aurait aucun inconvénient si l'on renonçait à toute marche automatique, comme cela supprimerait presque entièrement la pression hydrostatique à vaincre, sauf ce qui resterait sur la petite bande de pénétration dans le caoutchouc, la peine que l'on aurait à lever les tubes serait considérablement diminuée. Il est clair que pour cette manœuvre on n'aurait pas à se préoccuper de l'anneau employé pour faire de lui-même lever le tube d'aval directement conduit par l'autre.

Il restait, il est vrai, à examiner les effets de la succion de l'eau sur les anneaux inférieurs des deux tubes, puisqu'ils doivent se trouver en même temps séparés de leurs sièges dans cette manœuvre. J'ai déjà dit comment les choses se passent relativement à la première levée du tube d'amont. J'ai fai mettre les deux balanciers horizontaux, de manière que les deux tubes fussent levés à la même hauteur au-dessus de leurs sièges. Alors l'eau du bief d'amont s'est écoulée en même temps sous les deux tubes, qui sont restés pendant un certain temps à peu près à la même hauteur. Le tube d'amont a cependant fini par descendre un peu, en soulevant l'autre. Je ne tire aucune conclusion de ce fait quant à la comparaison des forces de succion, pour les deux tubes mobiles, ce résultat pouvant provenir de quelques circonstances particulières que je n'ai pas notées. En définitive il ne paraît pas que les deux forces de succion, agissant en sens contraire et se contrebalançant plus ou moins par conséquent, puissent être

un obstacle sérieux à la manœuvre, et dans tous les cas, il n'en reste pas moins évident que les efforts nécessaires pour la manœuvre seront très diminués, quand il n'y aura plus de différence entre les diamètres des tubes mobiles et ceux des arêtes inférieures de leurs anneaux.

Dans la manœuvre des tubes, agissant ainsi l'un sur l'autre, on perdrait à chaque période toute la quantité d'eau contenue dans ces deux tubes verticaux, si les choses étaient disposées comme à l'écluse de l'Aubois ; de sorte qu'il n'y a pas lieu, en ce moment, d'y faire des expériences complètes sur le rendement de cette manœuvre, il faudrait pour cela disposer dans chacun des tubes des pièces verticales fixes, ayant pour but d'occuper la place d'une grande partie de l'eau dont il s'agit, tout en laissant assez d'espace libre autour d'elles pour éviter les coups de bélier et pour qu'il n'en résulte pas des causes d'engorgement. Il est probable qu'au moyen de cette disposition, on augmenterait le rendement, parce qu'on supprimerait la plus grande partie des oscillations en retour qui, dans l'état actuel des choses, augmentent d'ailleurs la durée de la manœuvre. Au moyen de ces dispositions, quand on vide l'écluse, l'eau relevée au bief supérieur, au lieu de verser au sommet des tubes, *rentre au-dessous du tube d'amont.* Il y a lieu d'espérer qu'en la faisant rentrer ainsi par un grand orifice, il y aura plus d'avantages qu'à la faire verser au sommet des tubes. C'est d'ailleurs un détail à étudier par expérience.

Il faut, en définitive, pour faire rentrer l'eau au bief supérieur par un espace annulaire, soit au sommet des tubes, soit au-dessous de celui d'amont, donner à cette eau certaines vitesses d'autant plus grandes que la somme des espaces annulaires par où elle passera sera moindre. Or, si le liquide rentre seulement sous le tube d'amont, ce sera par un seul orifice annulaire. Il est donc convenable que ce dernier, s'il a le même diamètre que les sommets des tubes, ait une hauteur plus grande que l'épaisseur de chacune des

tranches d'eau annulaires qui sortiraient au sommet des tubes verticaux dans la manœuvre ordinaire. On voit qu'il est utile, à ce point de vue, que le tube d'amont ou la pièce qui en tiendra lieu, si l'on substitue aux tubes mobiles des tubes dont la partie supérieure soit fixe, la partie inférieure étant une vanne cylindrique ou une soupape de Cornwall, se lève assez haut afin de laisser alternativement libre un orifice annulaire d'une hauteur convenable. Il est d'ailleurs à remarquer, soit qu'on fasse verser l'eau par le sommet des tubes, soit qu'on ne la laisse entrer au bief supérieur que sous le tube d'amont, en prolongeant assez le tube d'aval pour qu'elle ne jaillisse pas à son sommet, que la colonne ascensionnelle dans le tube d'amont sera employée plus ou moins bien à produire un exhaussement d'où résultera de la vitesse d'évacuation latérale. En résumé, l'économie de la force vive, dans cette évacuation latérale, dépendra de la hauteur à laquelle on pourra, dans la pratique, lever le tube d'amont ainsi conduit par le tube d'aval.

Il est bien à remarquer qu'après les premiers essais, dans les manœuvres que j'ai fait exécuter à l'écluse de l'Aubois pour le remplissage, soit au moyen de la marche automatique du tube d'aval, soit en baissant ce tube à bras d'homme, soit en le faisant manœuvrer en même temps que le tube d'amont, ces deux tubes étant alors conduits l'un par l'autre, comme je viens de l'expliquer, j'ai toujours tenu à ce que le tube d'aval se levât en temps utile, *indépendamment du degré d'attention de l'homme qui fait la manœuvre.* Il en est résulté que l'air n'a pu s'introduire dans le grand tuyau de conduite; de sorte que des employés du canal, ayant été mis successivement en observation près de la porte d'aval de l'écluse, ont remarqué que l'eau y arrivait comme par un écoulement ordinaire, il suffisait dès lors pour empêcher les bateaux d'avoir un mouvement de va-et-vient gênant, dans le sens de la longueur de l'écluse, de prendre quelques précautions faciles, en resserrant les cordages à mesure que le bateau s'élevait

dans le sas. J'ai d'ailleurs indiqué ci-dessus d'autres moyens d'éviter ce mouvement. Quant à la manœuvre au moyen de deux tubes conduits l'un par l'autre, il est à remarquer que l'un doit toujours, si l'on veut, rester levé quand l'autre est baissé, parce que si l'écluse est pleine, le tube d'amont peut rester levé, et que, si elle est vide, le tube d'aval peut ne pas redescendre. Cela est même avantageux à certains égards pour diminuer la résistance à l'entrée et à la sortie des grands bateaux chargés.

Expériences relatives aux variations des niveaux dans le bief d'amont et dans le sas.

Dans les premières expériences faites à l'écluse de l'Aubois, les sommets des tubes verticaux étaient à la même hauteur. Mais comme le bief d'amont est très court, les variations du niveau sont aussi fréquentes qu'exceptionnelles. On ne put se contenter, après un certain nombre d'expériences, de donner à ces sommets une hauteur de $0^{m},10$ à $0^{m},15$ au-dessus des niveaux les plus ordinaires de ce bief. Il arrivait assez souvent que l'extrémité supérieure du tube d'aval était atteinte par les corps flottants, qui venaient engorger l'espace annulaire compris entre ce tube et sa cheminée, de manière à gêner la manœuvre.

Pour obvier à cet inconvénient, on exhaussa de $0^{m},30$ le sommet des deux tubes et la cheminée du tube d'aval. Par ce moyen, l'engorgement fut diminué au point de vue de sa fréquence, mais les variations de ce bief se présentent dans des conditions tellement insolites qu'on n'en fut pas complètement débarrassé. Le seul parti à prendre pour faire disparaître cet inconvénient consista à empêcher les corps flottants d'atteindre le haut du tube d'aval, en tenant le sommet du tube d'amont plus bas que celui du premier. La différence de

hauteur qu'on adopta fut de $0^m,15$. On était d'ailleurs libre de faire varier la hauteur du niveau dans le bief d'amont, de manière à étudier les effets de diverses manœuvres.

Pour se rendre compte du rendement d'une manière convenable, quelques observations sont nécessaires. On arrive en effet à des résultats assez singuliers, tels que celui-ci. Il semble au premier aperçu qu'on pourrait diminuer bien plus encore qu'on ne l'a fait le nombre des périodes de vidange, en laissant écouler beaucoup plus d'eau au bief d'aval dans les premières périodes. Mais en abaissant ainsi le niveau dans l'écluse, on a augmenté réellement *la hauteur* à laquelle l'eau devait être relevée au-dessus du niveau où elle y était puisée, et d'ailleurs on a considérablement augmenté le travail en résistances passives. Aussi, en débitant beaucoup plus d'eau au bief d'aval dans chacune des premières périodes qu'on ne l'avait fait d'abord on n'a pas sensiblement augmenté la quantité d'eau relevée par chacune d'elles.

Il résultait déjà des expériences de M. l'ingénieur en chef de Marne, faites en 1869 à l'écluse de l'Aubois, qu'on y augmentait d'une manière sérieuse le rendement en multipliant les périodes, du moins dans des limites dont je parlerai plus loin. Cela s'accorde aussi avec mes recherches antérieures et avec le résultat théorique, auquel j'ai été conduit par le calcul différentiel. En augmentant le nombre des périodes, on a diminué la quantité dont le niveau de l'écluse varie pour chacune d'elles.

J'ai essayé d'augmenter aussi considérablement les quantités d'eau débitées dans les premières périodes de remplissage. Mais le bassin de communication, entre la tête de la machine et le bief supérieur, n'a pas d'assez grandes dimensions pour que cette étude puisse être variée comme pendant la vidange de l'écluse. L'orifice de communication entre ce réservoir et le bief d'amont n'est pas, à cause de la disposition des lieux, aussi grand que je l'aurais désiré. La partie

de ce bassin, où l'eau descend jusqu'au siège du tube d'amont, a une section encore bien moindre que sa surface totale.

J'ai observé un effet qui n'avait pas été prévu pour le cas où le tube d'amont est resté levé trop longtemps. Le tube d'aval s'est levé de lui-même avant que l'autre fût descendu, ce qui était évidemment une mauvaise condition. L'eau, baissant dans ce petit bassin supérieur, la nappe liquide s'infléchissait sur la partie la plus profonde, dont je viens de parler, qui entourait le tube d'amont. Le niveau de l'eau s'y trouvait par suite assez bas, pour que le tube d'aval se levât de lui-même, comme s'il y avait eu une oscillation descendante.

Il y a lieu de penser qu'avec un bassin d'amont de dimensions suffisantes, on profiterait de l'évasement graduel de la bouche du tuyau près de l'écluse, pour augmenter pendant le remplissage du sas, bien plus qu'à l'époque de la vidange, les quantités d'eau débitées dans les premières périodes. Déjà il résulte des expériences faites à l'écluse de l'Aubois que cet évasement, qui n'avait pas été essayé dans les expériences antérieures répétées par les premières commissions d'ingénieurs des ponts-et-chaussées, sur ce système d'écluses, change l'état de la question. En effet, l'épargne est devenue plus grande pour le remplissage que pour la vidange du sas, ce qui était précisément le contraire avant ce perfectionnement, et de plus le nombre des périodes a été moindre pour la première opération que pour la seconde, le bassin d'épargne étant dans les deux cas employé seulement comme rigole de communication avec le bief d'aval.

Je reviendrai ultérieurement sur l'influence de cette bouche évasée dans les grandes oscillations initiales et finales et sur les limites des quantités d'eau qu'il est convenable de débiter soit pour remplissage, soit pour la vidange, afin d'obtenir le maximum de rendement.

Disposition de l'appareil ayant un seul tube vertical avec deux parties mobiles et un seul coude qui est arrondi.

Dans ma note précitée du 14 décembre 1844, j'avais conçu ces écluses à colonnes liquides oscillantes d'une manière beaucoup plus simple. Il est intéressant de signaler cette première forme, pour le cas où l'on reconnaîtrait que l'emploi des grandes vannes cylindriques, ou des soupapes de Cornwall, ne donnerait pas lieu à trop de difficultés pour l'usage dont il s'agit.

Il n'y aurait qu'un seul tube vertical, ayant deux parties mobiles. L'une serait le tube d'amont, l'autre, disposée en dessous, mettrait alternativement le grand tuyau de conduite en communication avec le bief d'aval. Le système n'aurait qu'un seul coude, placé au-dessous du siège de cette vanne ou soupape annulaire, tenant lieu de tube d'aval. Ce coude pourrait être arrondi. Si d'ailleurs on craignait d'augmenter la profondeur des fondations, il pourrait être disposé comme celui du tube d'aval de la planche VI, et même n'avoir aucun arrondissement intérieur. On y mettrait au besoin des lames courbes concentriques, pour diminuer la résistance de l'eau, comme je l'ai expliqué ci-dessus. La section du tuyau de conduite étant très grande, il ne paraît pas qu'on ait à se préoccuper beaucoup des engorgements qui pourraient résulter des herbes sur ces lames, si elles étaient trop près les unes des autres.

Si le tube d'amont, comme celui que je proposais dans l'ancienne note dont il s'agit, au lieu d'être d'une seule pièce, était formée de deux parties dont la plus élevée serait fixe, l'autre étant une vanne cylindrique ou une soupape annulaire, on pourrait évaser la première, de façon à favoriser

l'écoulement de l'eau au sommet, à peu près comme si elle sortait par deux tubes. On jouirait de l'avantage de ne pas avoir un coude brusque sous l'un des tubes précités. On pourrait d'ailleurs, pour éviter de perdre autant de force vive après les premières oscillations en retour, disposer une pièce centrale fixe permettant de graduer convenablement les sections. On laisserait au pourtour extérieur du sommet l'espace annulaire convenable pour le dégagement del'eau relevée au bief supérieur. On pourrait aussi profiter de cette disposition pour augmenter au besoin, pendant la vidange, les premières oscillations en retour. Mais comme cela diminuerait, pendant le remplissage, les hauteurs des oscillations remontantes, je ne fais qu'indiquer ce détail secondaire pour le cas où l'on se servirait, comme ci-dessus, d'un bassin d'épargne facilitant la marche automatique des périodes de remplissage.

Il est à remarquer qu'au moyen de ces vannes cylindriques ou soupapes annulaires, on pourrait obtenir une marche automatique partielle, en vertu des mêmes principes que pour les tubes mobiles précités. Il suffirait de disposer à leur extrémité inférieure, extérieurement pour celle d'amont, intérieurement pour celle d'aval, des anneaux ayant les propriétés dont j'ai parlé ci-dessus. Celle qui tiendrait lieu du tube d'aval pourrait, lorsqu'elle se soulèverait, entrer dans l'autre, un seul tube serait vidé ou rempli.

La durée des oscillations en retour, si elles ne se font que dans un seul tube, comme je viens de l'expliquer, sera diminuée selon les lois exposées dans la première partie de cet ouvrage. Il en résultera une économie de temps et même de force vive, parce que les vitesses pourront être moindres, ainsi que je l'expliquerai plus loin.

Cette disposition aurait aussi l'avantage de permettre de supprimer un bout du tuyau de conduite entre les deux tubes verticaux. L'eau contenue dans ce bout de tuyau devant être alternativement mise en mouvement ou réduite au repos,

c'est une cause de perte de force vive qu'il serait convenable de pouvoir éviter, quelque peu importante qu'elle soit. On remarquera aussi qu'il en résulterait une simplification dans les constructions. On n'aurait plus à s'occuper de tout ce qui, à l'écluse de l'Aubois, est relatif à la chambre du tube d'aval et à sa cheminée.

Voici la pièce justificative de 1844 dont je viens de parler et où l'on indique plus spécialement, d'ailleurs, comment sont séparés les deux biefs. Je la reproduis textuellement, parce qu'on peut voir, d'après ce que j'ai dit ci-dessus, en quoi consistent les petites modifications qu'il y aurait lieu d'y faire. J'ajouterai seulement que la vanne cylindrique, ou le tube vertical mobile disposé de manière à éviter les coups de bélier d'une grande colonne liquide, se trouve dans la quatrième partie de mon Mémoire sur les oscillations de l'eau dans les tuyaux, présentée à l'Académie des sciences, le 7 septembre 1867. Le tube vertical mobile a d'ailleurs été signalé dans un de mes Mémoires publié en 1838 par les *Annales des mines*. Il s'agissait précisément, dans ce dernier Mémoire, d'un appareil que je proposais pour vider un sas d'écluse, en relevant une partie de l'eau au bief supérieur, appareil qui a depuis été modifié, comme je l'explique dans cet ouvrage.

« J'ai communiqué à la Société Philomathique, le 3 août et le 21 décembre 1839, une machine élévatoire à une seule soupape dont j'ai exécuté un modèle fonctionnant, qui est au cabinet de l'Ecole polytechnique, et dont l'objet spécial était de vider un sas d'écluse en relevant une partie de l'eau dans le canal supérieur, ainsi que cela est bien spécifié dans les deux notes qui ont été publiées par le journal l'*Institut*. Le 19 février 1842, j'ai communiqué à la Société une modification importante du même appareil pour la soupape duquel je recommande l'emploi d'une espèce de vanne cylindrique ou soupape de Cornwall, quand la machine a un diamètre considérable. Une note est également insérée dans l'*Institut*. L'objet de celle que je dépose aujourd'hui est de faire remarquer, ce qui n'a peut-être pas été assez bien indiqué, que le même appareil peut servir, pendant la rentrée

de l'eau du canal supérieur dans l'écluse, à faire également rentrer la quantité d'eau qui était descendue dans le canal inférieur, sauf les pertes de force vive auxquelles il faut s'attendre, dans toute espèce de système hydraulique. Il suffit de prolonger en amont un des murs latéraux de l'écluse à l'extrémité duquel sera un mur de barrage. Je suppose que le tuyau horizontal de la machine parte de l'extrémité d'aval du sas et parvienne jusqu'à l'extrémité de ce mur prolongé, en s'enfonçant sous l'eau du bief inférieur. A cette extrémité où il se relève verticalement, se trouve la vanne cylindrique dont la disposition est décrite dans la note du 19 février 1842. Or, je dis que cette vanne ou soupape annulaire peut atteindre le double but de soupape d'évacuation pendant que l'écluse se vide et de soupape d'aspiration pendant qu'elle se remplit. En effet, sur le fond d'une cloison conique disposée au-dessus de cette vanne et qui sépare les deux biefs, se trouve une seconde vanne cylindrique ou soupape annulaire, fermée pendant tout le temps où l'écluse se vide, de manière à former une partie de la paroi de ce qui est alors un tuyau d'ascension où l'eau monte en temps convenable, comme on l'a expliqué, à l'époque où la soupape plongée se ferme par un moyen quelconque. Lorsque l'écluse est vidée, et qu'on veut la remplir, on fait le contraire. La soupape supérieure s'ouvre et permet à l'eau du canal supérieur de rentrer dans l'écluse, jusqu'à ce qu'une quantité de force vive suffisante soit emmagasinée dans le tuyau horizontal. A cette époque, la soupape inférieure s'ouvre quand l'autre se ferme, et l'eau du canal inférieur entre dans le tuyau où elle est en quelque sorte aspirée. Je dis en quelque sorte, parce qu'il n'est pas nécessaire que cela se fasse par une aspiration proprement dite. L'eau du large canal inférieur entre tout simplement, parce que sa pression latérale n'est plus contrebalancée. Quand la rentrée est finie, on ferme la soupape inférieure par un moyen quelconque, et l'eau se balance sans percussion dans le tuyau vertical.

« Il est essentiel de remarquer que l'emploi de ces deux vannes ou soupapes cylindriques, qui ne sont à la rigueur autre chose qu'une partie des parois du tuyau alternativement dérangées dans le sens de l'axe, rend impossible toute espèce de coup de bélier, *quand même on voudrait en produire*, parce que les sections transversales ne sont jamais bouchées. »

Description d'un modèle fonctionnant d'une autre disposition de l'appareil sans tube mobile.

Je vais donner la description d'une autre forme de l'appareil, qui peut aussi avoir ses avantages. Il est d'ailleurs intéressant, pour l'avenir, de conserver la trace de toutes les idées nouvelles sur ce sujet.

La pièce principale est un grand tuyau de conduite ou aqueduc, pouvant être entièrement *horizontal*, débouchant par une extrémité dans le sas, et, par l'autre, dans une capacité en communication avec le bief d'aval. Cette dernière extrémité, pour la forme dont il s'agit, est alternativement fermée au moyen d'une espèce particulière de clapet, dont l'axe horizontal est un peu au-dessus de son centre de figure.

A une distance convenable, pour ménager une chambre, en amont de cette pièce mobile, est disposé un tuyau vertical, toujours ouvert à ses deux extrémités. L'une d'elles débouche dans le tuyau horizontal, immédiatement au-dessus duquel ce tuyau vertical s'élève, celui-ci peut même, si l'on veut, faire partie d'un barrage, qui sépare une capacité en communication avec le bief d'amont de la capacité précitée en communication avec le bief d'aval.

Immédiatement en amont du tuyau vertical se trouve, dans une chambre au-dessus du tuyau de conduite, un autre clapet, dont l'*axe horizontal est parallèle* à l'axe du tuyau de conduite et assez près du centre de figure de ce clapet. Il faut, en effet, qu'on puisse l'ouvrir sans trop de difficulté, quand l'eau du bief d'amont le presse par dessus aux époques où elle n'est pas contre-balancée par de l'eau remplissant, à certaines époques, le tube vertical. L'axe de ce clapet est cependant assez éloigné de ce centre de figure pour

que, aux époques où la pression inférieure sera plus forte que celle de l'eau d'amont, le clapet se soulève de lui-même.

Je suppose qu'on veuille remplir l'écluse. On ouvre d'abord le dernier clapet dont je viens de parler, pour permettre à l'eau d'amont d'entrer dans le tuyau vertical et de faire pénétrer une certaine quantité d'eau dans le sas. Quand il y a une vitesse suffisante dans le grand tuyau de conduite, on laisse se refermer de lui-même le clapet d'amont. L'eau du tuyau vertical descend, et, bientôt, en vertu de la vitesse acquise, sa surface se trouve au-dessous du liquide du bief d'aval. Alors, la pression de ce dernier ouvre le clapet d'aval, et l'eau de ce bief, entrant dans le système, contribue au remplissage de l'écluse. On a pu alors regarder par le sommet du tube vertical, et les mouvements de l'eau ont paru se présenter d'une manière bien continue.

Lorsque la vitesse acquise dans le tuyau de conduite est éteinte, le clapet d'aval se referme de lui-même, soit à cause du poids de sa partie inférieure, soit à cause de l'oscillation en retour, qui tend à se faire de l'écluse vers le tuyau vertical. On recommence la même manœuvre jusqu'à ce que l'écluse soit remplie à une hauteur convenable. Il est d'ailleurs à remarquer que, dans les dernières périodes, l'oscillation en retour s'élevant au-dessus de l'eau du bief supérieur, le clapet d'amont peut s'ouvrir de lui-même ; de sorte que la marche peut devenir entièrement automatique pendant les dernières périodes de remplissage du sas.

Mais l'essentiel est d'avoir bien constaté que *la marche du clapet d'aval est entièrement automatique pendant toute la durée de ce remplissage*, ce qui, comme on va le voir, était loin d'être évident, de sorte qu'on n'a à s'occuper que d'un des deux clapets.

Cet effet paraît dû à ce que le clapet d'aval n'est pas immédiatement dans le prolongement de l'arête du tube vertical, surtout pour le cas, qui semble rationnel, comme on le verra plus loin, où la section de ce tube ne serait pas circulaire. Il

y a lieu de penser que, s'il n'y avait pas une chambre entre cette arête et ce clapet, la partie supérieure de celui-ci, qui doit s'ouvrir de dedans en dehors, pourrait être retenue par quelque phénomène de *diminution de pression* résultant du mouvement de l'eau. Or, sa partie inférieure, qui doit s'ouvrir de dehors en dedans, serait peut-être retenue par des tourbillons provenant du mouvement de l'eau dans l'angle formé par le clapet avec l'arête inférieure du tuyau de conduite.

Pour vider l'écluse, on ouvre d'abord le clapet dont je vieus de parler, ce qui n'exige pas un grand effort, son axe horizontal passant assez près de son centre de figure. Quand une vitesse suffisante est acquise par l'eau venant de l'écluse, on le laisse se refermer de lui-même. Or, il est essentiel de remarquer que le tube vertical, au bas duquel l'eau est en mouvement pendant l'écoulement en aval, permet à la colonne liquide de trouver au-dessus d'elle *un espace libre suffisant pour éviter un coup de bélier* à l'instant où le clapet d'*aval* se referme.

L'eau monte ensuite dans ce tube vertical un peu au-dessus du niveau de l'eau du bief supérieur, de sorte que le clapet d'amont s'ouvre de lui-même. L'eau relevée rentre ainsi dans ce bief, sans être *obligée* de se verser au sommet du tuyau vertical. Or, cela est surtout à remarquer pour le cas où le niveau de ce bief serait très variable; parce que, s'il fallait que l'eau se versât par le sommet de ce tuyau, il y aurait des circonstances où elle retomberait inutilement de hauteurs assez notables.

Quand la vitesse acquise est éteinte, le clapet d'amont se referme de lui-même, et il y a une oscillation en retour du tuyau vertical vers l'écluse. On profite du moment où elle est descendue le plus bas pour ouvrir le clapet d'aval, et l'on continue la même manœuvre jusqu'à ce que l'écluse soit convenablement vidée dans les limites pour lesquelles on l'a expliqué, relativement aux autres formes de l'appareil.

Dans les dernières périodes de vidange, les oscillations en retour descendent au-dessous du niveau de l'eau du bief inférieur; de sorte que, le clapet d'aval pouvant s'ouvrir de lui-même, la marche de l'appareil peut devenir entièrement automatique à la fin de cette vidange. Mais l'essentiel est d'avoir vérifié par expériences que, soit pendant le remplissage, soit pendant la vidange du sas, *on n'a jamais à s'occuper en même temps que d'un seul des deux clapets*, ce qui est moins embarrassant pour l'éclusier que pour d'autres formes de l'appareil.

Quant aux oscillations en retour, ascendantes dans le tuyau vertical pendant le remplissage, et descendantes pendant la vidange de l'écluse, il est intéressant, pour épargner le plus d'eau possible, de bien saisir l'instant de leur maximum, afin d'ouvrir, au moment le plus convenable, celui des clapets dont on a à s'occuper.

Il est intéressant de remarquer que la disposition du *clapet d'amont* lui permet de s'ouvrir de manière à *se présenter parallèlement à l'axe du tuyau de conduite*. Il fait donc le moins d'obstacle possible à l'eau qui doit passer, dans un sens ou dans l'autre, par l'espèce de coude résultant de la position de l'orifice qu'il doit alternativement fermer *sans boucher transversalement le tuyau de conduite*.

Le tuyau vertical *ayant pour but d'empêcher les coups de bélier*, l'essentiel, pour diminuer autant que possible la partie du déchet provenant de ce qu'il est alternativement rempli ou vidé, consiste à donner à sa section la forme la plus convenable pour restreindre sa capacité totale le plus possible, sans gêner trop sensiblement la veine liquide à son passage du tuyau horizontal dans le tuyau vertical. Or, dans les coudes à angle droit brusque, l'écoulement se fait surtout dans la partie d'aval, de sorte qu'on peut rétrécir sans inconvénient sérieux la partie d'amont du tube vertical. Il y a lieu de penser qu'on pourra donner à celui-ci une section à peu près rectangulaire.

Mais le modèle, à l'échelle du dixième, objet de la note que j'ai présentée à l'Institut, le 15 mai 1876, a principalement pour but de montrer comment les choses pourraient être disposées, du moins dans quelques circonstances particulières où les niveaux des biefs sont extraordinairement variables et où l'on tiendrait à diminuer autant que possible la profondeur des fondations, au moyen d'un tuyau de conduite *entièrement horizontal.*

La disposition générale dont je viens de donner la description permet à la partie de l'eau qui, pendant la vidange de l'écluse, doit sortir au bief inférieur d'y passer sans rencontrer aucun coude, sauf les déviations quelconques pouvant résulter du clapet d'aval. Par conséquent, elle se tient dans le tube vertical notablement moins haut que dans le tube d'aval de l'écluse de l'Aubois, où elle est frappée par dessous pendant son passage au bief inférieur. Il y a donc encore moins de chances pour qu'il y ait une secousse, d'ailleurs insignifiante dans tous les cas, lorsque la veine liquide se relève quand on interrompt sa communication entre le tuyau de conduite et le bief inférieur, *pour changer seulement de direction.*

Ce système n'a pas l'avantage de supprimer toute espèce de soupape, j'ai cru cependant devoir en signaler les principes. Sans entrer ici dans plus de détails, il est intéressant de faire remarquer qu'à la fin de la vidange et à celle du remplissage l'appareil peut fonctionner par des moyens semblables à ceux qui ont été essayés à l'écluse de l'Aubois.

Dans le cas où l'on reconnaîtrait que les grands clapets analogues à ceux dont il s'agit n'auraient pas d'inconvénients pouvant provenir, soit des chances d'engorgement par des herbes, soit de percussions qu'on aurait des moyens d'éviter, on pourrait en ajouter un au système à tubes mobiles. Ainsi, pour le cas où le tube d'aval est à l'extrémité du tuyau de conduite, on pourrait disposer dans ce tuyau, entre les deux tubes, un clapet qui serait tenu ouvert pendant toute la durée

de la vidange de l'écluse. Pendant le remplissage, il fonctionnerait d'une manière entièrement automatique. A cette dernière époque, le tube d'aval resterait constamment levé (1). Il y aurait même lieu d'essayer de substituer ce clapet au tube d'aval, en supprimant ce dernier, le tube d'amont étant conservé, et jouissant alors, d'ailleurs pour éviter les coups de bélier, de la propriété du tube vertical fixe employé dans le modèle dont je viens de donner la description et qui a été remarqué par plusieurs ingénieurs des ponts et chaussées.

Mais en signalant diverses formes de l'appareil, pour ne rien négliger de ce qui pourra être étudié dans l'avenir, je dois insister particulièrement sur les avantages résultant de ce que le système ayant deux tubes mobiles séparés permet, en supprimant toute espèce de clapet, de ne se préoccuper, ni du mouvement des herbes, ni des percussions que l'expérience a appris à supprimer pour la forme déjà essayée. Ainsi, dans l'état actuel des choses, les grillages ne paraissent même pas indispensables, et si l'on a à se préoccuper des herbes, ce n'est guère que pour les guides des tubes mobiles. Je reviendrai plus loin sur quelques détails.

Considérations théoriques sur la détermination du nombre de périodes conduisant au maximum de rendement.

La durée de chaque opération de remplissage ou de vidange est réglée par les nécessités du service. Mais il est intéressant de se rendre compte de l'augmentation de rende-

(1) Les propriétés de ce clapet sont analogues à celles de la soupape du bélier aspirateur. On pourrait donc en mettre un latéralement dans une tubulure convenable, au lieu de le disposer à l'intérieur du tuyau de conduite. Mais cela serait une chance de filtration de plus; tandis que, s'il est disposé à l'intérieur, il offre un moyen de plus pour éviter les filtrations quand l'appareil ne fonctionne pas.

ment qu'on pourrait obtenir dans des cas de pénurie d'eau extrême, si le temps n'était pas limité. Les pertes de travail, dont les rapports, susceptibles d'être modifiés dans des limites très étendues, peuvent servir à calculer les conditions du maximum de rendement dans plusieurs appareils de mon invention, se composent principalement de deux parties. L'une provient de chaque changement de période et peut être considérée comme une constante. Son importance, relativement au travail de l'eau, est, toutes choses égales d'ailleurs, en raison inverse de la quantité d'eau descendue à chaque période pour le cas où la chute motrice ne varierait pas.

La seconde partie du déchet vient des pertes de force vive résultant de l'écoulement de l'eau par un tuyau de conduite d'une assez grande longueur, en y comprenant celles qui résultent des mouvements aux extrémités de ce tuyau. On peut admettre qu'elles sont proportionnelles aux carrés des vitesses. S'il n'y avait pas de cause de déchet, ces carrés seraient, pour chaque période, en raison directe du volume d'eau déjà descendu avant l'instant considéré dans cette période, et le chemin parcouru serait proportionnel au même volume. Il est donc facile de voir que la quantité de travail nécessaire pour conserver les vitesses, comme si ces causes de déchets n'existaient pas, serait en raison directe du carré de la quantité d'eau descendue. De sorte qu'en définitive, pour chaque unité de volume descendu, le travail dont il s'agit serait en raison du volume total descendu à chaque période.

Ainsi, l'une des causes de déchet qui influent sur la recherche dont il s'agit est en raison inverse de la quantité d'eau motrice descendue en aval à chaque période, tandis que l'autre est en raison directe de la même quantité. D'après cela, il est facile de voir, soit par le calcul différentiel, soit au moyen d'un développement algébrique très simple, dans les hypothèses ci-dessus énoncées, quelles sont les conditions nécessaires pour que le déchet total soit un minimum relativement au travail dépensé par la descente de l'eau mo-

trice. On va voir que les deux quantités de travail qui seraient nécessaires pour vaincre ces deux causes de déchet devraient être égales entre elles. Mais il faut tenir compte de ce que, les résistances passives diminuant les vitesses, le travail perdu est, par cette raison même, moindre qu'on ne vient de l'admettre. La conclusion ne peut donc être suffisamment rigoureuse, que si les choses sont disposées de manière à rendre le travail perdu par chaque changement de période assez peu considérable, pour qu'une quantité égale de travail perdu par les résistances passives dans l'écoulement de l'eau par le tuyau de conduite, à cette période, n'empêche pas le carré de la vitesse d'augmenter à peu près proportionnellement à la quantité d'eau descendue dans la même période, avant que le tube d'amont ou d'aval soit baissé.

Soit C la perte de travail due à l'écoulement de l'eau par le tuyau de conduite à chaque période. En supposant que la perte de travail provenant du changement de période soit la même pour chacune d'elles, la perte totale sera égale à 2 C. Si l'une de ces quantités C est multipliée par $1 + K$, nous admettons provisoirement que l'autre est divisée par $1 + K$. On va voir ce qui en résulte.

Nous avons, au lieu de 2 C,

$$\frac{C}{1 + K} + C\,(1 + K) = \frac{C + C\,(1 + K)^2}{1 + K};$$

or, on a

$$2\,C = \frac{2\,C\,(1 + K)}{1 + K}$$

la perte totale est donc changée dans le rapport

$$\frac{C + C\,(1 + K)^2}{2\,C\,(1 + K)} = \frac{2\,C + 2\,K\,C + K^2\,C}{2\,C + 2\,K\,C}.$$

Les deux premiers termes du numérateur de la dernière fraction étant identiques à ceux du dénominateur, la perte

totale de travail, due aux pertes de force vive pendant l'écoulement de l'eau par le tuyau de conduite, et à la régulation, augmente en définitive de

$$\frac{K^2}{2K+2}.$$

On voit que cette augmentation n'est pas très rapide relativement aux variations que l'on peut faire éprouver à l'une ou à l'autre des deux parties de la perte de travail considéré.

Il est intéressant de se rendre compte de la raison des choses, quand on a été conduit ainsi à cette formule afin de voir plus facilement les conséquences qui en résultent.

Après avoir déterminé provisoirement par la règle précédente les conditions pour lesquelles on aurait le meilleur effet, je suppose qu'on augmente le nombre des périodes en diminuant le volume d'eau débité par chacune d'elles. Si le travail perdu est plus grand, c'est que la diminution des résistances passives provenant de ce que ce volume est moindre à chaque période ne compense pas l'augmentation de déchet résultant de ce que les changements de périodes sont plus nombreux. Or, il est facile de voir à cause de la manière dont les résistances passives augmentent avec les vitesses de l'eau que les carrés de ces vitesses n'augmentent pas autant que la quantité d'eau descendue à chaque période. Il en résulte que, si cette quantité d'eau est moindre, le travail en résistances passives ne diminuera pas aussi rapidement qu'on l'a supposé. Le travail perdu à cause de l'augmentation du nombre des périodes sera donc encore moins compensé par la diminution du déchet résultant de ce qu'il descend moins d'eau à chaque période.

Je suppose, au contraire, que le nombre de périodes diminue. Si le déchet est plus grand, cela résultera de ce que la partie provenant de l'augmentation de la quantité d'eau descendue à chaque période sera plus importante que celle qui a été épargnée par la diminution du nombre des périodes.

Or, dans la réalité, les carrés de vitesses n'augmentant pas comme le volume d'eau descendu à chaque période, la quantité de déchets attribuée par la théorie précédente à l'augmentation du volume d'eau sera moindre que ne le suppose cette théorie.

Ainsi que je l'ai indiqué ci-dessus, on voit comment la règle dont je viens de parler pour obtenir le maximum d'effet ne peut être assez rigoureusement applicable que dans les conditions où les pertes de force vive ne sont pas trop grandes relativement au travail fourni par la descente de l'eau à chaque période. Mais il est à remarquer que, si dans ces conditions on augmente la quantité d'eau descendue à chaque période, le travail en résistances passives n'augmentera pas autant que dans les hypothèses sur lesquelles repose la formule dont il s'agit. De sorte que la diminution du rendement sera moindre que ne l'indiquerait le développement de cette formule. Or, une erreur dans ce sens est souvent considérée, dans la pratique, comme une bonne chose quand il n'y a pas d'exagération. J'ai d'ailleurs expliqué ci-dessus qu'il faut d'assez grandes variations dans les rapports des deux causes de déchet dont il s'agit pour qu'il en résulte des différences de quelque importance. De sorte qu'on peut dans des limites assez étendues se servir de la règle dont je viens de parler pour déterminer les conditions qui conduisent au maximum de rendement. Il est facile de s'en rendre compte en faisant les calculs numériques dans diverses hypothèses entre les limites où ces considérations sont applicables.

Il s'agit maintenant de montrer comment les principes généraux peuvent s'appliquer à la théorie de l'écluse de navigation. Je remarquerai d'abord qu'ils peuvent servir à calculer aussi, pour divers appareils dont je parlerai plus loin, la longueur la plus convenable que doit avoir chaque tuyau de conduite d'un diamètre donné, afin d'obtenir le maximum de rendement. Je reviendrai ultérieurement sur l'application de ces principes à divers cas particuliers. Il suffit

en ce moment d'admettre, comme résultat d'expériences, que le tuyau de conduite doit avoir, en général, une assez grande longueur, on verra qu'elle ne sera pour ainsi dire limitée que par la dépense de la construction.

Soit pour le remplissage, soit pour la vidange de l'écluse, si l'on change le nombre des périodes de l'appareil, il résulte du mode de distribution des diverses oscillations en retour, que la somme des pertes de travail qui proviennent de celles-ci et de la manière dont elles font perdre de l'eau peut être considérée comme à peu près proportionnelle au nombre de ces périodes. Il ne s'agit, d'ailleurs, que du degré d'approximation suffisant quant aux calculs relatifs à la pratique.

On trouve d'après cela que, si cette somme est en raison de ce nombre, et si la quantité de travail perdu par suite des autres résistances passives est à peu près en raison inverse du même nombre on peut se servir de la règle ci-dessus énoncée. On sait d'ailleurs par expérience que les périodes de la machine ne doivent pas être trop peu nombreuses pour qu'on obtienne le rendement maximum. De sorte qu'on sait d'avance que le chemin parcouru par les résistances passives ne doit pas être bien grand pour ces conditions à chaque période, le volume d'eau à faire entrer dans l'écluse ou à en faire sortir par l'appareil étant une quantité donnée.

Le point intéressant à saisir pour tourner la difficulté consiste en ce que, au lieu de considérer un appareil à oscillations régulières, on considère des sommes d'opérations successives dont l'ensemble peut être regardé comme régulier.

En définitive on arrive à conclure que, pour obtenir le maximum de rendement, il est convenable, dans les limites indiquées ci-dessus, que la quantité de travail perdu, à cause de ce qui se passe dans la totalité des changements de périodes, soit assez sensiblement égale à celle du travail perdu par suite de résistances passives, proportionnelles à peu près aux carrés des vitesses de l'eau dans le tuyau de conduite. Il en résulte que le nombre des périodes conduisant au rendement

le plus fort devrait être assez grand, ce qui s'accorde avec les ndications de l'expérience, et que ce nombre dépasserait celui qui pourrait être admis dans la pratique, en supposant même qu'il fût possible de donner à chaque opération de remplissage ou de vidange de l'écluse une durée plus longue que ne le permet le service ordinaire de la navigation.

Il paraît donc qu'on ne doit en général se contenter d'un très petit nombre de pérodes, lorsqu'on ne se sert pas d'un bassin d'épargne, que si l'on tient plus à simplifier les manœuvres et à diminuer la durée des passages qu'à économiser autant d'eau qu'on le pourrait dans le cas où l'on en aurait absolument besoin.

A la rigueur il faudrait tenir compte, pour ces calculs approximatifs, des frottements variables pendant que le niveau de l'eau descend ou monte dans les tubes verticaux, lorsqu'ils ne sont pas remplis ou vidés. Mais cette considération est secondaire et n'empêche pas de pouvoir présenter comme suffisamment exacte la conclusion dont je viens de parler.

L'éclusée est une quantité d'eau donnée se divisant en autant de parties qu'il y a de périodes de remplissage ou de vidange. Le carré de la vitesse maximum obtenu à chaque période est proportionnel assez sensiblement, toutes choses égales d'ailleurs, dans certaines limites, à la quantité d'eau descendue dans cette période d'une hauteur moyenne donnée. Il est facile, d'après cela, de se rendre compte, dans les limites où l'on peut en avoir besoin pour les calculs de la pratique, de la manière dont varient les vitesses quand on change le nombre des périodes. Or, les résistances passives peuvent être considérées comme à peu près proportionnelles aux carrés des vitesses de l'eau dans les conditions où l'on doit appliquer ce genre de calculs.

Ce que je viens de dire suffit pour donner une idée de la manière dont on doit régler le nombre des périodes dans chacun des systèmes dont j'ai donné ci-dessus la description. On voit que, moins chaque changement de période occasion-

nerait des pertes de travail, toutes choses égales d'ailleurs, plus en général il conviendrait d'augmenter le nombre des périodes pour obtenir le maximum de rendement, quand on ne serait pas obligé de faire la manœuvre dans le temps le moindre possible. L'épargne du temps étant d'ailleurs très importante pour la navigation, il ne conviendrait d'appliquer ce que je viens de dire que dans des circonstances exceptionnelles, mais il était essentiel de bien fixer les idées sur les principes théoriques.

Expériences au moyen desquelles on détermine les formes des extrémités du grand tuyau de conduite.

Voici d'après quelles bases on doit calculer le déchet à ces extrémités. Ainsi que je l'ai dit dans la première partie de cet ouvrage, la perte de force vive pour les ajutages divergents n'est pas tout à fait de la même nature dans le mouvement permanent que dans le mouvement oscillatoire. Pour celui-ci la longueur des surfaces frottantes peut être augmentée sans qu'il en résulte plus de déchet à cause de la manière dont les vitesses sont modifiées. On peut donc donner beaucoup plus de longueur à un ajutage divergent, si le mouvement est oscillatoire, que s'il est permanent. Il en résulte qu'on peut diminuer, pour ainsi dire autant qu'on le veut, la perte de force vive provenant de ce que les sections varient dans l'ajutage. En définitive, on n'a guère à considérer que la perte de force vive résultant de ce qu'il reste à la sortie de l'ajutage une vitesse moyenne sensiblement en raison inverse de la section.

Il est donc difficile de préciser l'angle que doit avoir l'ajutage divergent par lequel le tuyau de conduite débouche dans l'écluse. Mais on voit qu'il est convenable de donner à

32

cet ajutage bien plus de longueur que si le mouvement était permanent. Quant à la section du débouché dans le sas, on peut aussi la faire plus grande. Pour les ajutages divergents il résulte des expériences décrites dans la première partie, que, s'ils sont plongés dans l'eau, le débit est pour certaines conditions bien plus considérable que si le liquide coule dans l'air comme ceux qui ont été expérimentés par Venturi. Dans ces ajutages, quand ils sont plongés, l'eau coule vraisemblablement avec plus de régularité, quoiqu'on ne soit pas obligé, dans certains cas, pour qu'ils soient bien remplis d'eau, ainsi que l'avait fait Venturi, de disposer un corps solide à leur intérieur, sans doute à cause des mouvements de l'air qui n'y entre plus. Il résulte de ces considérations que la section de sortie sera limitée seulement par la difficulté provenant des dispositions même de l'écluse. Si, par exemple, le tuyau débouche dans l'enclave d'une des portes d'aval, comme il est utile que son embouchure ne soit pas diminuée par la présence des grands bateaux chargés, la largeur de cette enclave paraît être, à peu près, la limite de celle de l'entrée du tuyau. J'ai, d'ailleurs, expliqué ci-dessus comment on peut modifier cette embouchure, au moyen d'une chambre latérale et d'un bout de canal ménagé dans le radier de l'écluse et que ces détails ont d'ailleurs moins d'importance, si l'eau entre ou sort par les deux extrémités du sas.

J'ai donné dans la première partie les formules au moyen desquelles on peut déterminer les pertes de force vive, dans des limites assez étendues, en supposant connus des coefficients de résistances qui peuvent être considérées approximativement comme proportionnelles aux carrés des vitesses. Le frottement, d'après des expériences faites depuis les recherches de Prony sur les tuyaux de conduite, doit être moindre pour les grands diamètres qu'on ne le croyait. Les pertes de force vive résultant des mouvements de l'eau aux extrémités du tuyau de conduite de mon système d'écluse, surtout si elles ne sont pas bien disposées, paraissent d'ailleurs

plus importantes que le frottement. Il est donc essentiel de fixer les idées sur les formes les plus convenables de ces extrémités.

J'ai fait des études à ce sujet au moyen de tubes d'un diamètre intérieur de $0^m,03$, dont je rendrai compte dans un chapitre spécial. Il est sans doute probable que les résultats pourront être notablement modifiés pour de grands diamètres. Mais ceux qui ont été observés indiquent suffisamment la marche des phénomènes pour montrer quel choix doit être fait quant à la disposition des coudes dans diverses circonstances.

D'après des expériences que j'ai faites il y a beaucoup d'années, et dont j'ai dit quelques mots dans la première partie, j'avais lieu de croire que la résistance, trouvée par Venturi sur un coude à angle droit brusque, était bien trop forte pour le cas où la partie d'aval de ce coude serait notablement plus longue que celle dont il s'est servi. C'est, en effet, ce qui vient d'être confirmé par des expériences faites à Cherbourg sous ma direction. Il en résulte d'ailleurs que la résistance peut au contraire être plus grande quand on diminue la longueur de cette partie d'aval.

Lorsque le coude brusque est posé au-dessous du tube d'amont, il y a en aval (je veux dire quant à la direction du mouvement) une longueur de tuyau au moins aussi grande par rapport au diamètre que celle qui suffit pour rendre la résistance bien moindre que ne l'indiquerait l'expérience de Venturi. Dans ce cas, si l'eau se dirige vers l'écluse, elle rencontre devant elle une longue colonne liquide. Si elle en revient, elle trouve au-dessus d'elle une colonne liquide, dont la hauteur augmente de plus en plus, jusqu'à ce que le tube vertical d'amont soit rempli.

Je suppose au contraire que le coude brusque soit au-dessous du tube d'aval, comme il est à l'écluse de l'Aubois. Il résulte des expériences précitées faites à Cherbourg, qu'il y a bien plus de résistance quand la partie du coude par laquelle

l'eau sort est très courte, que si l'on change de place l'extrémité de ce coude, cette même partie devenant alors celle qui est adaptée à un réservoir. Or, il est essentiel pour l'économie des constructions que le siège de ce tube soit le moins bas possible, quand l'écluse se vide. L'eau trouve en aval de ce coude lorsqu'elle sort de cette écluse, une tubulure *très courte*, qui n'est même formée que par l'épaisseur de la paroi en maçonnerie du grand tuyau de conduite et celle du siège du tube d'aval. On peut donc s'attendre à une résistance dépassant celle qui serait indiquée par l'expérience de Venturi. Le cas n'est pas le même, il est vrai, quand l'eau rentre du bief d'aval dans l'écluse en rencontrant devant elle une longue colonne liquide. Mais nous venons de voir que, si le coude brusque est sous le tube d'amont, l'eau trouve, *dans les deux sens du mouvement*, une colonne liquide dont la plus petite longueur est moins désavantageuse ; quand le tube d'aval est baissé pendant la vidange de l'écluse, il se présente aussi une colonne liquide comme pour l'ascension de l'eau dans le tube d'amont pendant le remplissage. Mais le cas est essentiellement différent tant que le tube d'aval, étant levé, permet à l'écoulement de se faire comme je l'ai expliqué pour la tubulure précitée.

On voit encore mieux d'après ce qui a été dit ci-dessus, pourquoi, toutes choses égales d'ailleurs, il y aura en général désormais un avantage incontestable à adopter la disposition générale de la planche VI, au lieu de celle qui a été construite à l'écluse de l'Aubois, quand même on n'aurait pas à s'occuper des grandes oscillations du bassin d'épargne vers l'écluse ou en sens contraire.

Il y a cependant une manœuvre pour laquelle, comme je l'ai indiqué ci-dessus, il paraîtrait convenable de mettre le coude arrondi sous le tube d'amont. Ce serait celle où les grandes oscillations se feraient dans un bassin en communication avec le bief supérieur. Mais il y a lieu de penser qu'il ne s'agit alors que de circonstances exceptionnelles.

On doit faire pour les coudes arrondis dont le rayon de courbure intérieure ne dépasse pas certaines limites, par exemple, quand il est égal au diamètre du tuyau comme dans des expériences précitées faites à Cherbourg, une remarque analogue à celle qui concerne les coudes à angle droit brusque. Il y a une différence essentielle dans la résistance d'après les expériences dont il s'agit, lorsque l'eau coule du tuyau dans le coude posé à son extrémité d'aval, ou quand l'eau entre du même coude dans le tuyau. Pour le dernier cas la résistance est bien moindre que dans le premier. De sorte qu'il ne serait pas inutile, même si le coude arrondi est à l'extrémité d'aval, de pouvoir y mettre des lames concentriques, mais cette remarque paraît très secondaire

M. Vallès a fait, sur les grandes oscillations initiales et finales, deux expériences disposées de manière que les amplitudes, quoiqu'elles fussent en sens contraire, étaient de la même grandeur dans l'écluse. Elles étaient chacune de $0^m,50$. A cette époque, le bassin d'épargne n'était pas réduit comme il l'est maintenant. Sa section moyenne, dans les limites de ces deux expériences, était à peu près à celle du sas comme 50 est à 31.

Il y avait une époque pour chaque oscillation où le niveau était le même dans ce bassin et dans l'écluse. Il s'agissait de voir, pour l'oscillation de vidange, quel était le rapport de la baisse de l'eau au-dessous de ce niveau à la hauteur dont elle était partie au dessus, et, pour l'oscillation de remplissage, quel était le rapport de la hauteur obtenue au-dessus du niveau dont il s'agissait pour ce cas, à la profondeur du point de départ au dessous. Le premier rapport a été de 0,22, le second de 0,33.

Sans regarder ces chiffres comme ayant une rigueur absolue, soit à cause des filtrations des portes, soit parce que dans ces mouvements, d'ailleurs assez lents, de grandes surfaces on peut craindre quelque petite erreur, je ferai remarquer que la différence de ces deux résultats est bien tranchée.

C'est pour l'oscillation se dirigeant vers l'écluse que le travail en résistances passives est le moindre. Il devait en être ainsi pour plusieurs raisons.

L'ajutage divergent par lequel l'eau entre dans le sas n'est pas aussi graduellement évasé qu'il pourrait l'être. Il ne l'est pas même aussi graduellement que celui de Venturi. Cependant il en résulte sans doute une économie de force vive dans ce sens du mouvement de l'eau, beaucoup plus grande que celle qui résulte à la même extrémité, pour le mouvement de l'eau en sens contraire, de ce que l'augmentation de section diminue la contraction de la veine liquide.

A l'autre extrémité du tuyau de conduite, à l'époque où il entre de l'eau dans l'écluse, le liquide rencontre devant lui une longue colonne en sortant de la partie extrêmement courte du coude à angle droit brusque, qui est immédiatement sous le siége du tube d'aval. Or, il résulte des principes développés dans la première partie, sur la manière dont la force vive est diminuée dans les étranglements, que la perte de force vive doit être beaucoup moindre pour ce sens du mouvement de l'eau à l'extrémité dont il s'agit, que pour le sens contraire. Cela est confirmé par les résultats des expériences précitées faites dernièrement à Cherbourg et auxquelles j'ai été conduit, en considérant, ainsi que je l'ai proposé depuis longtemps, comme un étranglement l'*écrasement* de la colonne liquide dans cette espèce de coude.

Je ferai remarquer aussi que, pour la disposition existante à l'écluse de l'Aubois, comme il est convenable que les deux tubes mobiles soient le plus près possible l'un de l'autre, la bouche de sortie au-dessous du tube d'aval est très près de la cloison qui sépare la chambre de ce tube du réservoir en communication avec le bief d'amont. Or, comme l'écoulement dans un coude à angle droit brusque se fait principalement dans la partie d'aval, cette cloison est un obstacle d'une certaine importance à la sortie de l'eau.

Pendant la vidange de l'écluse, non seulement l'eau sort

par un orifice bien moindre que celui par lequel elle sort dans l'autre sens du mouvement, à l'extrémité du tuyau de conduite qui débouche dans le sas; mais elle rencontre un obstacle dont on n'aurait pas à se préoccuper si le tube d'aval était à l'extrémité du tuyau de conduite comme dans la planche VI. Ainsi ce n'est pas seulement à cause des propriétés ordinaires du coude arrondi, que la disposition générale indiquée sur cette planche serait convenable, notamment pour les grandes oscillations. Je ferai remarquer aussi qu'à l'écluse de l'Aubois, à cause de la disposition des lieux, on n'a pas posé l'extrémité du tuyau de conduite portant les tubes mobiles vers la moitié de la largeur des chambres de ces tubes, ce qui est un inconvénient pour le dégagement de l'eau.

Comparaisons entre les rendements pour diverses manœuvres, et pour différentes dispositions, avec ou sans bassin d'épargne.

Dans les expériences faites à l'écluse de l'Aubois, en combinant le jeu de l'appareil avec les grandes oscillations dans un bassin d'épargne, dont la section moyenne est environ les deux tiers de celle du sas, on a, comme je l'ai expliqué, beaucoup simplifié les manœuvres. Mais le rendement résultant de ces manœuvres n'a pas dépassé celui qu'on obtenait au moyen du même nombre de périodes de la machine, quand on la faisait fonctionner sans bassin d'épargne, et même si l'on augmentait convenablement le nombre de périodes, le rendement était plus grand lorsqu'on se servait de ce bassin seulement comme rigole d'aval. Il s'agit maintenant de bien se rendre compte du degré d'utilité de chaque espèce de manœuvre, pour d'autres applications.

Une partie du déchet provient, quand il n'y a pas de bassin

d'épargne, de ce que, pour les premières oscillations de remplissage, les tubes verticaux doivent d'abord être occupés par de l'eau tombant du bief supérieur, avec d'autant plus de perte de force vive que les oscillations en retour remontent moins haut. Ainsi, pour la première période, le centre de gravité de cette eau descend sensiblement de la moitié de la hauteur de chute ; la colonne du grand tuyau de conduite résiste par son inertie. Il en résulte même une oscillation qui fait sortir de l'eau par le sommet du tube d'aval.

Ainsi que je l'ai expliqué ci-dessus, quand on se sert du bassin d'épargne, les oscillations en retour montent assez haut, pour que le tube d'amont se soulève de lui-même. La perte de force vive, que je viens de signaler, doit donc être alors à peu près supprimée.

Quant à la vidange de l'écluse, toute l'eau contenue dans les deux tubes verticaux au-dessus du niveau du bief inférieur tombe lorsqu'on lève une première fois le tube d'aval, et il en est sensiblement ainsi quand la manœuvre se fait avec le bassin d'épargne. A mesure que le niveau monte dans ce dernier, la perte provenant de ce qu'il reste de l'eau dans les tubes verticaux, après l'oscillation descendante, est moindre que si cette eau retombait jusqu'au niveau du bief d'aval. Ces oscillations descendent d'ailleurs de plus en plus bas, diminuant déjà elles-mêmes la quantité d'eau, dont le centre de gravité descend ainsi en pure perte et même d'une manière nuisible. Les dernières parviennent assez bas pour que le tube d'aval se relève de lui-même, et que la perte dont il s'agit puisse être regardée comme supprimée. A l'époque du remplissage la force vive de l'eau qui tombe dans les tubes verticaux ne peut pas être considérée comme étant entièrement perdue, puisqu'elle fait même sortir de l'eau par le sommet du tube d'aval dans une circonstance précitée. Mais cette action est sans importance, à cause de la longueur du grand tuyau de conduite.

Dans la pratique, on réduira autant que possible le nombre

des périodes. La perte de force vive résultant des descentes brusques de l'eau, dont je viens de parler, aura généralement très peu d'importance, relativement aux pertes provenant de l'ensemble des résistances passives qui peuvent être considérées comme proportionnelles aux carrés des vitesses. L'essentiel pour comparer les pertes dans les diverses manœuvres, avec ou sans bassin d'épargne, consiste donc à se former une idée approximative de la moyenne des vitesses dans tous les cas.

Cela serait assez compliqué, si l'on voulait y mettre une extrême rigueur, en tenant compte de la manière dont, même s'il n'y avait pas de cause de déchet, les vitesses varieraient dans les différentes circonstances dont il s'agit. Mais il suffit, pour ce genre d'approximation, de déterminer à peu près le maximum de la vitesse engendrée par chaque descente de l'eau, avant que la vitesse commence à diminuer. Ce que j'ai dit dans la première partie suffit pour qu'on puisse s'en rendre compte.

Lorsqu'on se sert du bassin d'épargne, dans la grande oscillation finale de décharge, les vitesses sont nécessairement assez notables quand elles arrivent à leur maximum. Dans la grande oscillation initiale de remplissage, elles sont plus considérables. On voit d'après cela comment on peut comparer le travail en résistances passives, dans ces oscillations, à celui qui résulte des vitesses provenant, dans le même tuyau de conduite, de la descente d'une tranche d'eau donnée, se dirigeant, soit dans un sens, soit dans l'autre.

Or, comme les grandes oscillations initiales et finales donnent lieu à beaucoup de travail en résistances passives, on voit, abstraction faite même de ce que j'ai dit ci-dessus, combien il est intéressant que le coude arrondi se trouve audessous du tube d'aval, surtout quand on se sert d'un bassin d'épargne, comme dans les dernières expériences faites à l'écluse de l'Aubois, où le coude à angle droit brusque se trouve malheureusement sous ce tube.

Il paraît incontestable, d'après les considérations précédentes, qu'au moyen d'une bonne disposition du coude arrondi, il y aurait de l'avantage même, quant au rendement, à employer ainsi le bassin d'épargne. On peut disposer les choses de manière à faire passer la plus grande partie de l'eau par ce coude, soit dans un sens, soit dans l'autre. Or, si cela n'augmentait pas la moyenne des carrés des vitesses, on diminuerait évidemment le travail en résistances passives, mieux que dans les manœuvres pour lesquelles, toutes choses égales d'ailleurs, une plus grande fraction de l'eau à débiter serait obligée de passer par l'autre coude qui est à angle droit brusque. En définitive c'est une même quantité d'eau qui doit traverser le système, quel que soit le genre de manœuvre.

On pourrait examiner, au moyen des mêmes principes, les effets de deux autres manœuvres dont j'ai dit quelques mots ci-dessus. Dans l'une, on transforme alternativement la rigole d'aval en bassin d'épargne, en employant une soupape ou porte de flot, quand l'appareil ne fonctionne plus assez utilement. Il en résulte un avantage sans aucun inconvénient pour l'épargne. Dans l'autre manœuvre, une soupape ou porte de flot isole alternativement un bassin ou une rigole supérieure du bief d'amont. Il n'est pas aussi certain que l'avantage qui en résulte pour le rendement soit sans quelque compensation. Il n'est pas, d'ailleurs, encore suffisamment prouvé par l'expérience qu'il soit facile de rendre automatiques ces soupapes ou portes, en les conservant assez étanches. Mais j'ai cru devoir indiquer ces dispositions particulières pour compléter l'exposition des principes, abstraction faite des différences qui pourront en résulter dans le durée des manœuvres et dont on peut se rendre compte.

Pour compléter les principes des écluses de navigation à colonnes liquides oscillantes, je vais exposer succinctement quelques dispositions au moyen desquelles on pourrait, sans employer une machine proprement dite, faire le service des

écluses *de petite navigation*. Afin d'éviter tout malentendu, je dois dire que l'idée de considérer comme les branches verticales d'un grand siphon renversé, soit deux écluses jumelles, c'est-à-dire parallèles et à la même hauteur, soit une écluse et un bassin latéral, n'est pas nouvelle. Mais je crois être le premier qui ait donné les règles nécessaires pour montrer dans quelles limites il est utile d'augmenter la longueur que doit avoir la branche horizontale d'un siphon de ce genre.

Il était d'ailleurs indispensable, pour appliquer cette idée sur une assez grande échelle, d'avoir un moyen d'établir et d'intercepter alternativement la communication d'une grande colonne liquide en mouvement avec l'une ou l'autre des capacités dont il s'agit, de manière à éviter les coups de bélier. Or, j'y suis parvenu par l'emploi d'un large tube mobile, toujours ouvert à ses deux extrémités, et ne bouchant jamais la section transversale de l'aqueduc ou tuyau de conduite.

Il est convenable que ce dernier, lorsqu'on emploiera un bassin d'épargne et que les localités le permettront, débouche au milieu de ce bassin, auquel on donnera une section circulaire. J'ai indiqué cette disposition, ainsi que celle du tube vertical mobile dont il s'agit, dans une communication faite à la Société Philomathique le 30 novembre 1844, et sur laquelle une note a été publiée par le journal l'*Institut*, dans l'extrait du procès-verbal de la séance de cette Société du 4 janvier 1845. Il est bien entendu que l'extrémité du tuyau de conduite, débouchant dans le bassin d'épargne, sera recourbée de manière à recevoir le tube vertical mobile comme celle qui est représentée dans la planche VI. Cette combinaison paraît la plus simple pour un tuyau de conduite de très grande section. Ce n'est pas celle à laquelle j'avais d'abord pensé. J'avais proposé de boucher alternativement la section transversale d'une extrémité, au moyen d'une ou plusieurs soupapes, en ménageant, pour éviter les coups de bélier, un tuyau vertical ouvert par les deux bouts et posé assez près de cette extrémité, afin que l'eau pût y monter le plus

librement possible, comme dans une des formes de l'appareil décrites ci-dessus. Il n'est pas sans quelque intérêt de conserver la trace de cette idée qui peut aussi avoir ses avantages.

Je me suis aperçu depuis que la section du bassin d'épargne, s'il a toute la hauteur de l'écluse, doit être moindre que la section de cette dernière.

Dans la séance de la Société Philomathique du 9 novembre 1844, j'ai proposé de vider un sas au moyen de plusieurs oscillations successives dans une série de puits verticaux, dont une partie s'élèverait au-dessus du bief supérieur. Les sections de ces puits étant chacune moindres que celle de l'écluse, pour la première oscillation de décharge, le niveau de l'eau monterait plus haut que celui de ce bief. Il pourrait en être ainsi pour la suivante, mais les décharges successives feraient élever l'eau à des hauteurs d'autant moins grandes qu'on s'approcherait plus de la dernière.

Quand on voudrait faire rentrer l'eau dans l'écluse, après avoir achevé de la vider par les moyens ordinaires, on ferait l'opération inverse, c'est-à-dire, en commençant par les capacités où l'eau se serait élevée le moins haut.

Je n'entrerai pas dans les détails de la disposition, objet de la note dont il s'agit. Si d'ailleurs une combinaison semblable d'oscillations était appliquée, comme ce serait surtout à cause de la simplicité qui pourrait en résulter dans les manœuvres, on ne se servirait probablement que de deux capacités latérales au moyen d'un tuyau de conduite ayant une bifurcation. L'essentiel est de remarquer qu'en produisant deux ou plusieurs oscillations de décharge ou de rentrée, on trouverait beaucoup moins de travail en résistances passives d'après les principes exposés dans la première partie de cet ouvrage, que si l'on se contentait d'une seule oscillation, comme on le verra mieux plus loin. Je vais d'abord considérer cette dernière combinaison comme je l'ai fait dans une note présentée à l'Institut, le 10 décembre 1877.

Il résulte des lois de l'oscillation de l'eau dans les siphons

renversés, à branches de sections inégales, exposées dans la première partie, que, dans le cas dont il s'agit, l'écluse étant pleine et le niveau du bassin d'épargne étant à la même hauteur que celui du bief d'aval, l'eau s'élèverait au-dessus du niveau du bief d'amont dans ce bassin d'épargne, en vertu de l'oscillation de vidange, s'il n'y avait pas de résistances passives. A cause de ces résistances, l'eau s'y élèvera moins haut que si elles n'existaient pas et l'on peut calculer approximativement quel doit être le rapport de la section du bassin d'épargne à celle de l'écluse pour que l'eau monte dans le bassin d'épargne à une hauteur convenable au-dessus ou au-dessous du niveau du bief supérieur. Je suppose d'abord ce rapport déterminé, de manière que la grande oscillation de vidange remplisse le bassin d'épargne précisément jusqu'à la hauteur du niveau d'amont et qu'on achève de vider l'écluse au moyen des ventelles ordinaires. Il est facile de voir qu'en supposant les résistances passives de la même nature pour une oscillation de remplissage que pour une oscillation de vidange, toute l'eau que celle-ci avait fait entrer dans le bassin d'épargne rentrera dans l'écluse. En effet, si l'on suppose pendant la vidange l'eau à une même hauteur dans le sas et dans le bassin, le rapport de la hauteur obtenue ensuite au-dessus de ce niveau à la profondeur du point de départ au-dessous, sera le même que le rapport qui sera ensuite obtenu pendant le remplissage du sas, entre la profondeur qu'on trouvera en définitive au-dessous d'une hauteur pour laquelle l'eau aura été de niveau dans le sas et dans le bassin, à la hauteur du point de départ au-dessus. On aura à tirer du bief supérieur, supposé à niveau constant comme celui du bief inférieur, une quantité d'eau égale à celle qu'on avait fait descendre à ce dernier bief.

Dans ce système, l'éclusier aura à faire fonctionner les ventelles des portes d'écluse d'amont et d'aval. Il aura seulement de plus à s'occuper d'un tube mobile vertical posé alternativement dans le bassin d'épargne sur l'extrémité

recourbée verticalement, d'un grand tuyau de conduite dont l'autre extrémité débouchera dans l'écluse. Il le fera fonctionner une fois pour la vidange et une fois pour le remplissage de l'écluse.

Il est bien à remarquer que l'inconvénient des bassins d'épargne étant, en général, dans la pratique, de perdre, par les défauts des vannes, une partie de l'eau économisée, il était essentiel d'éviter d'employer des vannes ou soupapes pour le bassin d'épargne dont il s'agit, comme cela aurait été nécessaire si sa section n'avait pas été moindre que celle de l'écluse. Lorsqu'on ne se servira pas de ce système, il n'y aura aucune chance de filtrations du bief d'amont dans le bassin d'épargne. Quand il fonctionnera, il n'y aura de chances de filtrations de ce bassin dans l'écluse que sous le tube mobile, qui peut être disposé de manière à bien conserver l'eau, en se posant convenablement sur son siège fixe.

Ce tuyau mobile, bien plus facile à manœuvrer qu'une vanne ou une soupape ordinaire, a, comme je l'ai expliqué ci-dessus, l'avantage de ne jamais fermer les sections transversales du tuyau de conduite. Mais la quantité d'eau qu'il contient, quand il repose sur son siège, ne reste pas dans le bassin d'épargne. Si l'on a égard à ce qu'il pourrait se perdre un peu d'eau entre le tube mobile et son siège, et si, pour compenser cette perte, on élève un peu le niveau du bassin d'épargne au-dessus de celui du bief d'amont, il faut, à la rigueur, tenir compte de ce que la section de ce bassin sera, en réalité, un peu diminuée par la présence de ce tube, qui doit toujours s'élever au-dessus de l'eau. Pour faire descendre l'eau de ce bassin jusqu'au niveau du bief d'aval par une oscillation de remplissage de l'écluse, il ne serait pas indispensable d'élever ainsi un peu d'eau au-dessus du niveau d'amont, si, quand on lèvera le tube mobile, celui-ci ne devait pas être rempli d'eau. En définitive, outre les pertes de travail provenant des résistances passives, il

faut tenir compte, à la rigueur, des pertes de force vive provenant de ce que l'eau contenue dans ce tube, d'une petite section d'ailleurs par rapport à celle du bassin d'épargne, tombera quand on achèvera de vider l'écluse, tandis qu'à l'époque où on la remplira, ce tube devra commencer par être rempli d'eau tombant d'une hauteur moyenne égale à la moitié environ de la hauteur du sas. Ces considérations sont d'ailleurs très secondaires, je les indique seulement pour ne rien négliger.

Si, au lieu de donner au bassin d'épargne une section moindre que celle de l'écluse, on lui avait donné une section plus grande, je conviens que les choses auraient pu être disposées de manière à remplir et à vider entièrement l'écluse sans se servir des ventelles des portes d'amont et d'aval, ce qui aurait un peu accéléré le service. Mais il aurait fallu achever de remplir le bassin d'épargne par une communication alternative avec le bief d'aval ; or, j'évite ces deux causes de filtrations par la combinaison dont je viens de parler. Mais ce n'est pas le point essentiel, puisque d'ailleurs, si l'on employait l'autre combinaison on pourrait peut-être supprimer les ventelles des portes de l'écluse. Je suppose, pour une comparaison provisoire, qui semble d'ailleurs peu éloignée de la vérité, que je donne à la section du bassin d'épargne les trois quarts de celle du sas, on épargnerait ainsi à peu près les trois quarts de l'éclusée, sauf les considérations secondaires dont j'ai parlé ci-dessus.

On va voir à quel résultat on serait conduit, quant aux résistances passives, dans le cas où l'on donnerait au contraire à l'écluse une section qui serait les trois quarts de celle du bassin d'épargne. Il est clair que, abstraction faite de ces résistances, les différences des niveaux seraient les mêmes dans les deux cas, sauf les petites différences provenant de la place occupée par le tube mobile ; mais les vitesses qui occasionnent les résistances passives et le chemin parcouru par ces résistances augmenteraient beaucoup. Le carré de la vi-

tesse, à l'époque où le niveau est le même dans l'écluse et dans le bassin d'épargne, serait, abstraction faite des résistances passives, sensiblement proportionnel à la quantité d'eau passée par le tuyau de conduite et ayant parcouru les mêmes hauteurs dans les deux cas. Or, si l'on suppose les résistances passives proportionnelles aux carrés des vitesses, il en résulte que la quantité de travail qui serait nécessaire pour conserver ces vitesses comme s'il n'y avait pas de cause de déchet, serait comme le carré des quantités d'eau précitées. Sans entrer dans le détail des calculs, j'ai cru devoir donner une idée assez précise des inconvénients qu'aurait un système à oscillation unique, si la section du bassin d'épargne était plus grande que celle de l'écluse, parce qu'un ingénieur a proposé cet élargissement du bassin d'épargne, étant d'ailleurs frappé de ce que cela permettrait d'accélérer le service en ce qu'on achèverait de remplir ou de vider ce bassin pendant que les bateaux passeraient. Quant aux oscillations, leur durée serait augmentée; il est d'ailleurs essentiel de remarquer que la dépense serait bien plus grande, à cause des dimensions du bassin d'épargne.

Mais, dans ce système, cette durée sera si courte qu'il est prudent d'indiquer des moyens de l'augmenter. Or, il est utile, pour diverses raisons, de donner au tuyau de conduite une longueur qui ne sera limitée, dans la pratique, que par la dépense qui en résultera pour la construction. Si les surfaces frottantes sont plus longues, les carrés des vitesses sont moindres et les résistances ou les pertes de force vive locales sont diminuées. C'est surtout pour les extrémités qu'il faut avoir égard à ces pertes de force vive, qu'on peut diminuer beaucoup, au moyen d'évasements graduels. Cela permettra même de ne pas donner au grand tuyau de conduite un diamètre à beaucoup près aussi considérable qu'on pourrait le croire nécessaire au premier aperçu, son frottement devant être, en général, bien moins important, pour les dimensions dont il s'agit, que des pertes de force vive qui se présente-

raient à ces extrémités si elles n'étaient pas évasées et qu'il eût un plus grand diamètre.

C'est d'ailleurs seulement pour les écluses de petites sections, comme celles du canal du Berry, et pour des circonstances exceptionnelles, qu'il me semble pouvoir être le plus intéressant d'étudier le système, assez coûteux, du reste, dont je viens de parler. Si les amplitudes des grandes oscillations sont trop considérables, cela augmente beaucoup les pertes de travail. Il serait donc convenable de diviser l'opération au moins en deux parties, pour les écluses de dimensions ordinaires, afin de retrouver des conditions qui ne s'éloigneraient pas trop de celles des écluses dites de petite navigation.

Abstraction faite même du prix de construction, il y a des diamètres qu'on ne peut guère dépasser pour le grand tuyau de conduite, d'autant plus qu'il est très important que ses extrémités puissent être graduellement évasées. On arriverait même, par le calcul, à un singulier résultat pour le cas où le bassin d'épargne, au lieu d'avoir une section moindre que celle de l'écluse, en aurait une plus considérable, et où le tuyau de conduite, s'il n'avait pas une longueur trés-grande, ne serait pas évasé à ses extrémités, parce qu'il aurait toute la section qui pourrait lui être donnée.

Dans cette hypothèse, je suppose qu'on élargisse le bassin d'épargne, au lieu de le rétrécir et qu'on veuille le remplir alternativement jusqu'au niveau du bief d'amont. Il résulterait des pertes de force vive aux extrémités de ce tuyau que la section de ce bassin devrait, pour qu'on pût remplir le sas par une seule oscillation, être bien plus grande relativement à celle de l'écluse qu'il ne le semble peut-être quand on n'en a pas fait le calcul. On serait ensuite obligé de laisser descendre au bief d'aval une quantité d'eau restée dans ce bassin, tellement notable qu'il ne paraît pas qu'il pût résulter aucun avantage de l'emploi de cette disposition, si le tuyau de conduite n'avait pas une longueur très-grande pour un sas de dimensions ordinaires.

Le système sur lequel j'ai fait une communication à la Société Philomatique de Paris, le 8 novembre 1845, et qui paraît le plus simple dans les circonstances où il pourra être appliqué, consiste à établir alternativement la communication entre deux écluses dites *jumelles*, au moyen d'un grand tuyau de conduite. Il est facile de voir que, dans ces conditions, si l'on vide une de ces écluses par une seule oscillation, on remplira l'autre, sauf, bien entendu, les causes de déchet, le remplissage et la vidange pourront s'achever ensuite par les moyens ordinaires. Or, la manœuvre serait plus simple et l'économie de la force motrice plus grande, toutes choses égales d'ailleurs, que dans le cas où une écluse se viderait, aussi au moyen d'un grand tuyau de conduite dans un bassin de même section et de même hauteur qu'elle, s'il fallait une autre grande oscillation pour remplir ensuite le sas. Quant aux écluses jumelles, il *n'est pas nécessaire que l'eau traverse deux fois le système pour chaque remplissage d'un sas.* On pourrait facilement établir dans une chambre latérale près de l'un des sas, comme je l'ai expliqué plus haut, un tube mobile ouvert à ses deux extrémités, venant alternativement se poser sur un siège horizontal à l'extrémité convenablement disposée du tuyau de conduite et jouissant des mêmes propriétés que ceux dont j'ai parlé ci-dessus. Je reviendrai plus loin sur les écluses jumelles, il ne s'agit en ce moment que de donner une idée générale du mode d'action des résistances passives.

Dans les circonstances, sans doute rares, où il serait possible d'avoir, à la moitié environ de la hauteur du sas, un bassin d'une étendue suffisante par rapport à la section de l'écluse, le travail en résistances passives provenant des oscillations précitées, pourrait être bien diminué, toutes choses égales d'ailleurs, sans qu'il y eût deux écluses jumelles. En effet, s'il avait une section dont la grandeur serait indéfinie, le centre de gravité de l'eau qui y entrerait ou en sortirait, jusqu'à ce que le niveau fût à la moitié de la chute de l'écluse,

descendrait d'une hauteur moitié moindre environ que si ce bassin avait une section égale à celle de cette écluse. Cela diminuerait beaucoup les vitesses, et par suite les résistances passives. On aurait de plus l'avantage d'augmenter la durée de l'oscillation, ce qui diminuerait, pour les bateaux, les inconvénients pouvant provenir d'oscillations trop rapides. Le déchet, s'il est proportionnel aux carrés des vitesses, et si une même quantité d'eau doit passer dans un sens ou dans l'autre, serait sans doute, abstraction faite des bateaux, à peu près le même dans certaines conditions, que lorsqu'il n'y aurait pas de bassin latéral, et que deux écluses jumelles communiqueraient, comme je l'ai déjà dit ci-dessus, par un tuyau de conduite, de manière à former les deux branches verticales d'un grand siphon renversé. Cependant les conditions ne sont pas les mêmes que dans les cas où l'on chercherait le travail nécessaire pour conserver les vitesses, comme s'il n'y avait pas de résistances passives. En effet, celles-ci diminuent les vitesses, et par conséquent le travail réel en résistances passives, pourra être plus grand que la moitié de celui qui aurait lieu pour les oscillations se faisant avec un bassin latéral d'une section égale à celle d'un sas par un tuyau de conduite de dimensions données.

Dans toutes les hypothèses, si l'on veut remplir ou vider une écluse par une seule oscillation, il paraît prudent de ne le faire qu'au moyen de deux grands tuyaux de conduite, débouchant à ses deux extrémités. Si l'enclave d'une porte d'aval est l'endroit le plus favorable pour y faire déboucher un de ces tuyaux, à l'autre extrémité de l'écluse, il y a en général un espace plus ou moins grand qui reste libre, surtout à cause de la forme des bateaux, sans qu'on soit absolument obligé de prendre les précautions dont j'ai parlé plus haut pour faire entrer l'eau immédiatement en aval du mur de chute. Les bateaux qui sont à vapeur et à hélice laissent d'ailleurs une certaine place derrière eux quand ils descendent. Si l'on emploie ainsi deux tuyaux de conduite, ils peu-

vent se réunir de manière à déboucher par une extrémité convenablement disposée dans un des bassins latéraux dont j'ai parlé, de sorte que, soit au moyen d'un seul tube vertical mobile, soit au moyen d'une seule vanne cylindrique ou soupape annulaire, on peut les faire fonctionner d'après les principes exposés ci-dessus.

On pourrait diminuer considérablement le déchet dans le service des écluses, en employant des bassins d'épargne étagés, comme on le sait depuis longtemps, mais leur nombre est un inconvénient. Or, on peut diminuer ce nombre si l'écluse est alternativement en communication avec ces bassins par des tuyaux de conduite et des tubes verticaux mobiles. Il est difficile de faire, dans l'état actuel de nos connaissances, des calculs bien rigoureux sur ce déchet, quand les tuyaux de conduite n'ont pas une assez grande longueur.

Mais si, afin de se former une idée de la marche des résultats, on fait, pour un moment, abstraction de la présence des bateaux dans l'écluse, il est facile de voir, pour certaines conditions, que le travail total en résistances passives, sera à peu près en raison inverse du carré du nombre de ces bassins.

Je suppose qu'une quantité d'eau M fois moindre, descende d'une hauteur moyenne aussi M fois moindre, la force vive sera M^2 fois moindre, abstraction faite de tout déchet. Or, si une même quantité d'eau devait passer par un tuyau de conduite de dimensions données, on conçoit comment le travail en résistances passives pourrait être en raison inverse du carré du nombre de ces bassins latéraux, dans le cas où l'on calculerait le travail qui serait nécessaire pour conserver les vitesses comme s'il n'y avait pas de cause de déchet. La diminution du déchet ne sera pas aussi grande par des raisons données ci-dessus et à cause de divers détails d'exécution.

Je dis quelques mots de ce calcul secondaire, seulement pour fixer les idées sur la marche des résultats de la théorie.

Il sera propablement plus convenable d'employer au plus deux ou trois bassins, selon les principes exposés ci-dessus, et en général, il vaudra mieux appliquer, avec quelques modifications, le système déjà essayé à l'écluse de l'Aubois, d'autres, dont j'ai parlé ci-dessus, ne l'ayant été que sur de petits modèles. L'écluse à *oscillation unique* avec bassin d'épargne de section moindre que celle du sas n'a été étudiée que sur un très petit modèle, ayant seulement pour but de montrer à quelques ingénieurs qui l'ont visité, toute la simplicité de l'appareil.

En comparant divers systèmes que j'ai proposés pour remplir et vider les écluses par des tuyaux de conduite, au moyen d'oscillations, il faut, afin de compléter ce que j'ai dit ci-dessus, étudier plus spécialement les phénomènes du mouvement de l'eau à son entrée dans l'écluse et à sa sortie. Il est convenable de donner la plus grande section possible à l'extrémité du tuyau de conduite qui débouche dans le sas. Je suppose que la largeur de cet orifice ne diffère pas beaucoup de la moitié de celle de l'écluse, et qu'il verse l'eau dans l'enclave d'une des portes d'aval. S'il n'y avait pas de bateau et si l'écluse était un canal communiquant toujours avec le bief inférieur par son autre extrémité, les mouvements de l'eau à son entrée auraient une grande analogie avec des phénomènes décrits dans la première partie de cet ouvrage, relativement aux coudes brusques de certaines dispositions des canaux d'usines. La résistance de l'eau dépendrait, comme je l'ai dit plus haut, de la manière dont la veine liquide se *contracte* dans la portion du tuyau qui est en aval d'un coude. Si cette dernière est trop courte pour que la veine liquide puisse la remplir, cela est une cause d'augmentation de déchet, ce qui s'accorde avec la théorie des ajutages. Or, le cas ne semble pas meilleur, d'après l'hypothèse dont il s'agit, quand l'eau entre dans l'écluse, d'autant plus qu'il n'y a pas même de paroi recouvrant l'eau à sa sortie. Cela empêche de profiter d'une manière analogue à ce qui se présente

dans les ajutages cylindriques de longueur convenable de la percussion du liquide sur celui qui les remplit en aval de la section contractée. Si l'écluse forme ainsi la grande branche d'un coude à angle droit vif, d'une largeur à peu près double de celle de l'orifice d'arrivée, quand il y a deux portes d'aval, il y a lieu de penser, malgré les tourbillons résultant des augmentations de sections que cela est une cause de diminution sensible dans la résistance de ce coude, et que cela peut tendre à compenser, jusqu'à un certain point, la cause d'augmentation de déchet dont je viens de parler. Cependant il est prudent de ne pas supposer cette cause de perte de force vive moindre que pour un tuyau ordinaire ayant un coude à angle droit vif, d'autant plus que, en général, il faut tenir compte de ce que les portes d'aval présentent des angles qui sont une cause de déchet, et de ce que l'enclave opposée à l'orifice, est encore une cause quelconque de flexion des filets liquides, excepté dans les écluses de petite navigation, où il n'y a qu'une seule porte d'aval. Mais alors le sas formant la seconde partie du coude, peut être d'une largeur analogue à celle de l'extrémité du tuyau, s'il débouche dans l'enclave de cette porte.

J'ai supposé provisoirement dans les considérations précédentes un courant établi dans le sas, afin de pouvoir comparer le phénomène à ceux que j'ai observés sur les coudes à angle droit vif d'un canal découvert. Dans cette hypothèse, la vitesse de *la veine écrasée* serait perdue pour l'effet qu'on veut produire ; tandis qu'elle devient un obstacle si l'on rétablit les choses telles qu'elles le sont réellement, en interceptant toute communication de l'écluse avec le bief d'aval pendant le remplissage. On sait, en effet, que si une masse d'eau s'introduit dans des circonstances analogues, elle tend à produire une onde du genre de celle que l'on nomme *solitaire*, l'inertie de l'eau résistant de manière à former un gonflement. Or, cela est nuisible à l'écoulement de l'eau qui rentre dans le sas, puisqu'il en résulte une cause de résistance sur l'orifice

d'introduction. Si cette onde peut se promener d'une extrémité à l'autre de l'écluse, elle peut offrir par son mouvement de retour une nouvelle cause de résistance. Supposons maintenant qu'il y ait dans le sas un bateau chargé occupant la plus grande partie de la section de l'écluse, il faudra tenir compte de ce que l'eau sera obligée de passer sous le bateau ou le long de ses flancs dans un espace d'abord assez resserré et dont la section augmentera, il est vrai, quant à la partie qui est sous le bateau, à mesure que ce dernier montera. Il y a là une cause de résistance variable dont le calcul doit être d'autant plus difficile qu'il faut tenir compte du frottement de l'eau contre les parois de l'écluse et contre le bateau lui-même.

J'ai eu seulement pour but, dans l'exposé succinct des considérations précédentes, de faire voir comment le déchet provenant des mouvements de l'eau peut avoir une certaine importance par rapport au frottement de l'eau qui serait amenée dans le sas par un assez long tuyau de conduite d'un grand diamètre, même abstraction faite de ce que j'avais déjà dit. Cela suffit pour montrer combien il est utile de pouvoir évaser d'une manière graduelle et convenable l'extrémité de ce tuyau qui débouche dans le sas. On peut en conclure que son diamètre serait limité plus qu'on ne le croirait peut-être au premier aperçu, si, pour éviter des étranglements immédiats ou les inconvénients quelconques d'une chambre de communication, etc., on le faisait déboucher dans l'enclave d'une des portes d'aval.

Il faut ajouter aux résistances provenant du mouvement de l'eau à son entrée dans le sas celles beaucoup moins importantes qui proviendront de la contraction de la veine liquide à l'époque de la vidange, en tenant compte des mouvements de l'eau dans l'écluse qui formera encore une des branches d'une sorte de coude à angle droit vif, d'une espèce, il est vrai, très différente de celle qui résultait du mouvement dans l'autre sens. Pour les petites écluses les sections des deux bran-

ches du coude peuvent être considérées dans certaines limites comme n'étant pas très différentes l'une de l'autre, celle d'aval pour la vidange serait le tuyau, *véritable ajutage*.

On voit, d'après ces diverses considérations, que, tout en conservant la trace des dispositions permettant d'employer des oscillations de très grandes masses liquides, il ne faut pas exagérer leur importance pratique au point de vue de l'épargne de la force vive. Aussi, tout en coordonnant ces divers systèmes, j'appelle surtout l'attention sur ceux qui permettent de restreindre ces oscillations dans certaines limites. On a vu d'ailleurs dans la première partie qu'il n'est pas sans intérêt de diminuer les grandes ondes qui, dans le service ordinaire des écluses, font quelquefois perdre de l'eau au-dessus des portes de l'écluse qui est à l'autre extrémité d'un bief d'aval. Déjà une épargne quelconque diminue ces ondes.

Dispositions spécialement relatives aux écluses jumelles.

Le cas des écluses *jumelles* dont j'ai déjà dit quelques mots est peut-être celui auquel il sera le plus intéressant d'appliquer le système mixte des périodes de l'appareil combinées avec les grandes oscillations initiales et finales. Je suppose qu'à chacun des deux sas qui sont à la même hauteur, est un appareil disposé d'abord de manière à fonctionner au moyen de rigoles d'aval et d'amont, sans que l'on considère aucun bassin latéral. Ils pourront être remplis ou vidés indépendamment l'un de l'autre. Il ne sera pas même bien utile de s'occuper des grandes oscillations initiales ou finales pouvant résulter de l'emploi de ces rigoles, ainsi que cela a été expliqué ci-dessus pour une écluse isolée (1).

(1) J'ai dit quelques mots des oscillations dans ces rigoles pour les écluses simples, surtout afin de compléter l'exposition des principes.

Mais il y a des circonstances assez fréquentes où il est utile qu'un des sas se vide pendant que l'autre se remplit. On conçoit que, si une communication peut être convenablement établie entre l'appareil de vidange d'une des écluses et l'autre sas, l'eau qui descendra de la capacité qu'on doit vider, en relevant par son travail une partie de l'eau au bief supérieur, pourra s'introduire dans l'autre sas, au lieu de s'écouler au bief inférieur. L'appareil fonctionnera dans ces conditions d'une manière parfaitement analogue à celui de l'écluse de l'Aubois pendant les dernières expériences, répétées en présence de M. Vallès. Mais il y aura une différence essentielle. L'eau ne sera plus obligée de traverser deux fois le système pour être employée utilement, puisque la capacité où elle entre doit elle-même être remplie pour faire monter ou descendre un bateau.

On n'aura à se servir, si l'on veut, que des périodes de l'appareil de vidange. Quand celui-ci ne fonctionnera plus assez utilement, au moyen d'une communication dont je parlerai plus loin, on laissera se produire une grande oscillation qui aidera à vider le premier sas et à remplir le second. On pourra achever ensuite la vidange du premier et le remplissage du second par les tuyaux de conduite du système.

Il est à remarquer que les têtes des deux appareils peuvent être disposées dans un *terre-plein*, séparant les deux écluses

Quant aux écluses jumelles, le cas est très différent. Pour les premières, un remplissage précède ou suit une vidange, tandis que pour les secondes, si l'on avait préparé les choses dans cette hypothèse, et s'il fallait au contraire que le remplissage d'un sas fût suivi du remplissage de l'autre, ou que la vidange de l'un fût suivie de celle de l'autre, les dénivellations dans les rigoles seraient nuisibles.

Quant à l'oscillation dans la rigole supérieure, il n'est pas sans quelque intérêt d'ajouter à ce que j'en ai dit pour les écluses simples, que la dénivellation qui en résulterait dans le sas au commencement de la vidange, permettant d'obtenir une oscillation en retour plus profonde, après la première période de l'appareil, pourrait favoriser la marche automatique.

jumelles. Une seule rigole d'amont et une seule rigole d'aval suffiront pour les deux machines. On pourra mettre les tubes mobiles, soit près de la partie d'amont, soit près de celle d'aval des deux sas, selon qu'on le trouvera plus convenable dans chaque circonstance. Si le tuyau de conduite relatif à chaque écluse débouche, soit dans l'enclave d'une des portes d'aval, soit vers le milieu de la longueur du sas, au moyen des précautions que j'ai indiquées ci-dessus, ce qu'il y a de plus pratique paraît être de disposer les deux systèmes de tubes mobiles près du bief inférieur. Il n'y aurait plus, en effet, de rigole d'aval. Celle d'amont serait plus facile à ménager dans le terre-plein qu'une rigole d'aval ne le serait pour le cas où les têtes de machines seraient au contraire près du bief supérieur sans rigole d'amont.

Mais il sera intéressant pour accélérer la manœuvre de disposer, comme je l'ai expliqué plus haut, les choses de manière à faire sortir d'eux-mêmes les bateaux de chaque sas au bief inférieur. Pour cette manœuvre il serait utile de faire déboucher chaque tuyau dans chacun des sas, immédiatement en aval du mur de chute, c'est-à-dire au besoin dans une capacité en communication avec cette partie de l'écluse. On profiterait de l'économie qu'il est possible d'obtenir dans le prix des constructions, en ménageant la plus grande partie de chaque tuyau de conduite dans les deux bajoyers de chaque écluse. On réunirait au moyen d'un coude arrondi les deux portions parallèles dont je viens de parler.

J'ai indiqué plus haut comment on pourrait disposer les choses de manière à faire entrer l'eau aux deux extrémités de chaque écluse. Dans ce cas, un tuyau de conduite avec bifurcation partant, comme je l'ai expliqué de la moitié de longueur de l'écluse, viendrait sans inconvénient rejoindre celui des bajoyers de cette écluse qui est du côté du terre-plein. En longeant ce bajoyer dont il ferait partie, il pourrait se prolonger jusqu'au bief d'aval, parce que, dans des limites très étendues, plus le tuyau de conduite est long, plus il y a

d'avantages pour l'économie de la force motrice, et pour la facilité des manœuvres.

Les deux sas doivent pouvoir, comme je l'ai dit, communiquer alternativement l'un avec l'autre le plus librement possible. Il suffit pour cela que le tuyau de conduite d'une des deux machines se prolonge horizontalement, par un coude arrondi en quart de cercle au-delà du siège du tube d'aval. Ce siège, au lieu d'être mis sur une portion recourbée du tuyau de conduite, ainsi que dans la planche VI, sera comme celui du tube d'amont, sur une partie rectiligne. Le prolongement horizontal dont je viens de parler portera un siège avec tube mobile sur son extrémité recourbée verticalement, ou disposée de manière à recevoir des lames courbes concentriques, comme on l'a expliqué ci-dessus.

Le tube vertical dont il s'agit étant destiné à mettre alternativement en communication le tuyau de conduite d'un des sas, avec l'autre écluse, il sera nécessaire de le disposer dans une chambre en communication avec celle-ci. Quand il sera baissé, l'appareil de l'autre sas pourra marcher d'une manière indépendante. Lorsque les périodes de vidange de cet appareil ne fonctionneront plus, on baissera son tube d'aval, puis on lèvera son troisième tube. L'eau ne rencontrera aucun coude brusque à cause de la manière dont j'ai dit qu'on avait dû modifier, pour celui des deux appareils dont je viens de parler, la disposition du tuyau de conduite à cette extrémité *sous le tube d'aval*. Le liquide n'aura à se détourner dans un coude de très petit rayon de courbure, qu'à son passage sous le troisième tube pour entrer dans le second sas. On baissera le tube de communication dont il s'agit à cette extrémité, quand la grande oscillation sera finie.

Alors les deux sas *redeviendront indépendants l'un de l'autre*, de sorte que le tuyau de conduite de chacun d'eux pourra servir, soit à achever de le vider, soit à achever de le remplir. Il ne sera plus même nécessaire de conserver les ventelles

des portes à moins qu'on ne veuille les calfater pour les employer dans des circonstances exceptionnelles.

Il y a un des deux sas pour lequel on pourra faire fonctionner plus avantageusement que pour l'autre l'appareil de remplissage, si l'on veut s'en servir après la grande oscillation, c'est celui dont le tuyau de conduite communique alternativement avec l'autre écluse. Au lieu de faire marcher le tube d'aval pour relever de l'eau quand on veut achever de le remplir, après la grande oscillation, on lèvera alternativement en temps utile le troisième tube qui est dans la chambre de communication précitée. L'eau sera puisée dans l'autre sas à une profondeur moindre que si elle était tirée du bief inférieur.

Pour l'autre sas, quand on le remplira, on fera marcher le tube d'aval, car, si l'on voulait faire l'opération précédente pour les deux sas, cela compliquerait l'appareil, il en résulterait d'ailleurs la nécessité de faire une seconde chambre de communication dans des espaces resserrés. Or, on aura déjà quelque peine à ménager la première dans le terre-plein séparant les deux sas.

Il paraît même utile, pour ménager le passage de l'eau sortant alternativement du tube d'aval au bief inférieur, de ne pas faire perpendiculaire à la longueur de sas le mur de séparation des rigoles d'amont et d'aval. Il faut remarquer que la disposition du troisième tube dont je viens de parler est une cause sensible de perte de travail, en ce qu'il fait mettre le tube d'aval sur la partie horizontale du tuyau de conduite. De sorte que l'eau, pour couler au-dessous de ce tube, lorsqu'il est soulevé, passe réellement par un coude à angle droit brusque. Cet inconvénient est sans doute bien moindre que l'avantage résultant des grandes oscillations initiales et finales, mais il était convenable de le signaler. On sait, par les expériences faites à l'écluse de l'Aubois, que ces grandes oscillations n'ont pas d'inconvénient relativement à la tranquilité des bateaux. Ainsi il n'y aura aucune raison

pour ne pas mettre immédiatement en communication avec l'enclave d'une des portes d'aval la chambre destinée à recevoir le troisième tube précité, ce qui simplifiera la construction. M. Briquet, conducteur principal des ponts-et-chaussées, qui m'a conseillé de voir s'il serait possible de mettre les têtes des deux machines dans un terre-plein entre les deux sas, a eu la complaisance de faire des dessins d'exécution, d'où il résulte qu'il suffira que ce terre-plein ait une largeur de sept mètres.

Il est à remarquer que les têtes des deux machines étant dans ce terre-plein se trouveront pour ainsi dire dans une île plus à l'abri du public que si une seule machine était disposée latéralement pour une écluse simple.

Quand la communication sera établie entre les deux sas au moyen d'un des appareils, on pourra au besoin faire fonctionner en même temps les deux sas en se servant de l'autre appareil lorsqu'ils doivent se remplir ou se vider ensemble. Dans ce cas exceptionnel les manœuvres seraient ralenties, mais un seul éclusier ferait facilement le service (1).

(1) Dans ce qui précède, j'ai considéré les manœuvres comme devant être faites pour chaque sas d'une manière tout à fait indépendante de l'autre. Mais il est intéressant de conserver la trace des dispositions d'une extrême simplicité auxquelles j'avais pensé d'abord, d'autant plus qu'il ne sera peut-être pas impossible de les appliquer dans quelques rares circonstances.

Je suppose qu'un grand tuyau de conduite en forme de siphon, posé horizontalement, soit mis dans le terre-plein entre les deux sas et qu'il débouche par chacune de ses extrémités dans chacun de ces sas immédiatement en aval du mur de chute, c'est-à-dire au moyen d'une chambre de communication dans laquelle fonctionnera un tube dit d'aval. Chaque extrémité de ce tuyau de conduite porterait une tête de machine composée comme ci-dessus de deux tubes d'amont et d'aval. Celui-ci étant dans la chambre précitée permettrait de communiquer en temps utile avec le sas qui lui est contigu, et chaque tube d'amont permettrait aussi en temps utile de communiquer avec le bief supérieur.

Un des sas pourrait servir à l'autre de rigole de décharge si ses portes d'aval étaient ouvertes, et l'un des deux tubes d'aval étant alors toujours levé. Quand ces portes seraient fermées, il servirait de bassin

Moyens de simplifier le calcul du travail en résistances passives.

On se rendra plus facilement compte de la manière d'appliquer les considérations présentées ci-dessus, quand on connaîtra mieux les moyens d'apprécier le travail en résistances passives résultant de l'écoulement *graduel*, abstrac-

d'épargne, c'est-à-dire il aurait les propriétés exposées ci-dessus relativement aux écluses jumelles; puis, lorsque les périodes de l'appareil de vidange ne fonctionneraient plus, rien n'empêcherait de produire la grande oscillation finale, quoiqu'il n'y eût en tout que quatre tubes mobiles. Pour continuer à remplir l'autre sas, on ferait marcher ensuite les périodes de l'appareil de remplissage, en tirant encore de l'eau du sas qui se vide, de niveaux plus élevés que celui du bief inférieur.

Dans cette disposition générale, les têtes des machines seraient auprès du bief supérieur. Il n'y aurait ni rigole d'aval ni rigole d'amont.

L'extrême simplicité de cette disposition me paraît mériter d'être signalée. Mais elle est moins pratique que celle dont j'ai donné la description ci-dessus pour les écluses jumelles, parce qu'on demande généralement que les deux sas puissent au besoin fonctionner *indépendamment* l'un de l'autre. Il faudrait d'ailleurs conserver les ventelles des portes d'écluse, pour achever de remplir ou de vider les deux sas, ce qui est un inconvénient.

Je mentionnerai aussi la disposition suivante. On pourrait encore n'avoir qu'un seul aqueduc ou tuyau de conduite en forme de siphon horizontal analogue à celui dont je viens de parler, mais les extrémités portant les tubes mobiles seraient mises près des portes d'aval. On ajouterait d'ailleurs à chacune de ces extrémités un bout d'aqueduc rectiligne et horizontal avec tube vertical mobile. Mais au lieu d'être posé dans une capacité plus ou moins gênante en communication avec le sas contigu, le siège de ce tube serait, dans le bief inférieur, de manière à pouvoir servir alternativement quand un des sas serait isolé au moyen de la baisse de son tube d'aval. Chacun de ces sas pourrait achever de se vider par son tube supplémentaire dont je viens de parler.

Mais ces formes de l'appareil, *à un seul tuyau de conduite*, ne per-

tion faite de ce qui se passe quand les tubes verticaux sont brusquement remplis ou vidés. J'ai indiqué dans la première partie, pages 153 et suivantes, les bases au moyen desquelles on peut calculer les effets de chaque période de remplissage. Je reprends le cas d'une écluse simple. Il suffit d'ajouter quelques mots pour montrer à quelle simplicité les calculs pourront, en général, être réduits. Je vais spécialement considérer le cas où l'on ne se sert point d'un bassin d'épargne.

S'il n'y avait pas de cause de déchet, il serait très facile de déterminer la *hauteur due* à la vitesse dans le grand tuyau de conduite, en supposant le bief d'amont à niveau sensiblement constant. Jusqu'à ce que la communication soit interrompue avec le bief d'amont, il suffirait de voir quelle est la quantité d'eau sortie de ce bief et de quelle hauteur son centre de gravité serait descendu, l'eau montant plus ou moins dans l'écluse.

A partir de l'instant où la communication avec le bief d'amont est interrompue, l'eau contenue dans les tubes verticaux baisse en se dirigeant vers l'écluse, et il est encore facile de voir de quelle hauteur son centre de gravité descend jusqu'à l'époque où elle arrive au niveau de l'eau dans le sas. Elle continue ensuite à couler vers l'écluse, et à partir de ce moment, la vitesse est retardée dans le tuyau de conduite. Mais il est toujours facile, pour chaque tranche d'eau des-

mettent pas de rendre les sas complètement indépendants l'un de l'autre, comme la disposition décrite ci-dessus quand on veut épargner l'eau dans les deux.

Si d'ailleurs, un autre aqueduc très court, disposé sous le terre-plein, permettait de mettre les deux sas en communication quand cela serait utile, quoiqu'il n'y eût qu'un seul grand tuyau de conduite, l'appareil pourrait, soit vider en même temps les sas, soit les remplir de même.

Quant aux tubes mobiles dont je viens de parler pour chaque bout d'aqueduc horizontal, ils n'ajouteraient aucune nouvelle cause de filtrations lorsque le système ne fonctionnerait pas, et qu'il n'y aurait pas d'eau dans les sas au-dessus du niveau d'aval, les tubes d'amont étant baissés.

cendue, de voir quelle serait la *hauteur due* à la vitesse dans ce tuyau, s'il n'y avait aucune cause de déchet.

Je suppose maintenant qu'on cherche d'abord quelle sera cette *hauteur due*, en tenant compte des résistances passives proportionnelles par hypothèse aux carrés des vitesses. Il suffit de savoir quelle sera la quantité de travail absorbé par ces résistances. On peut commencer par chercher la quantité de travail qui serait nécessaire pour conserver les vitesses, comme s'il n'y avait pas de cause de déchet. Il suffirait de multiplier le chemin parcouru dans le tuyau de conduite, par une certaine moyenne des carrés des vitesses multipliée elle-même par un coefficient constant relatif aux résistances passives. On pourrait admettre, sans beaucoup d'inexactitude, si chaque période de l'appareil était d'assez peu de durée, que la *hauteur due* moyenne diffèrerait peu de la moitié de la *hauteur due* à la vitesse finale. Mais, d'après ce que j'ai dit dans la prémière partie, on peut, sans aucune difficulté, déterminer cette quantité assez exactement. Le travail en résistances passives calculé de cette manière sera plus grand que le véritable, par la raison même que les vitesses sont diminuées, mais il est facile de le calculer plus rigoureusement au moyen d'approximations successives.

Il s'agit maintenant de trouver la hauteur à laquelle l'eau s'élèvera dans l'écluse, en vertu de la vitesse acquise à partir de l'instant où, son niveau étant assez descendu dans les tubes verticaux, le tube d'aval établira la communication avec le bief inférieur supposé à niveau constant. On fait provisoirement abstraction de quelques petits mouvements secondaires, notamment dans ces tubes. Il est facile de voir comment les calculs seraient modifiés, si l'eau était tirée d'un bassin d'épargne.

Il suffit de pouvoir déterminer la quantité de travail en résistances passives qui, jointe à la quantité de travail résistant provenant du poids de l'eau dans l'écluse, supposée de section constante, sera suffisante pour réduire à zéro la vi-

tesse qu'on aura ainsi trouvée dans le grand tuyau de conduite. Le travail de la pesanteur, agissant pour diminuer les vitesses dans ce tuyau, dépend : 1° d'une hauteur égale à celle du niveau de l'eau dans l'écluse au-dessus de celui du bief d'aval, à l'instant dont il s'agit, quand il n'y a pas de bassin d'épargne; 2° de la hauteur variable de l'eau au-dessus du niveau considéré ainsi comme point de départ dans l'écluse, à partir du même instant, soient h la première hauteur dont je viens de parler, et x la seconde dont on veut trouver la limite, si l'on suppose cette limite connue, la pression résistante moyenne de l'eau sera proportionnelle à $h + \frac{1}{2} x$. Le chemin parcouru sera proportionnel à x. Le travail résistant de la pesanteur sera donc proportionnel à $h x + \frac{1}{2} x^2$. Si donc on cherchait x, abstraction faite de toute résistance passive, connaissant une vitesse donnée dans le grand tuyau de conduite, il est facile de voir comment on trouverait x au moyen d'une équation du second degré, en négligeant la petite vitesse du niveau de l'eau qui monte dans le sas.

Supposons connue la limite de x pour le cas où il y a des résistances passives, il suffirait, pour déterminer la longueur du chemin de ces résistances dans le grand tuyau de conduite, de multiplier cette quantité par le rapport de la section de l'écluse à celle de ce tuyau.

J'ai montré, dans la première partie, comment on peut calculer la quantité de travail qui serait nécessaire pour conserver les vitesses comme s'il n'y avait pas de résistances passives, dans les divers cas qui peuvent se présenter. On peut en conclure une limite supérieure de la perte de hauteur provenant de ces résistances.

En les estimant comme je viens de l'indiquer, elles seront supposées plus grandes qu'elles ne le sont réellement, par la raison même qu'elles diminuent les vitesses. Mais on peut les calculer plus rigoureusement d'une manière très suffisante,

en général, dans la pratique par des approximations successives conduisant à des valeurs alternativement au-dessus et au-dessous de la vérité. Si d'ailleurs, dans divers cas, on trouve plus prudent de s'en tenir à un premier calcul conduisant à un déchet plus grand que le véritable, il est utile d'indiquer, au moins d'une manière succincte, comment on peut faire, par des moyens extrêmement simples, des calculs approximatifs bien suffisants pour la pratique, au lieu de se donner la peine de faire les calculs numériques compliqués, auxquels on serait conduit par une formule contenant des exponentielles.

Ainsi que je l'ai dit ci-dessus, à la rigueur les calculs seraient assez compliqués. Mais, dans la pratique, on pourra, en général, ne pas tenir compte de quelques détails. Ainsi, les surfaces en mouvement ne sont pas rigoureusement horizontales dans le sas ou les bassins d'épargne. Je reviendrai sur des phénomènes secondaires plus intéressants pour la science que pour les calculs de l'ingénieur.

Nouvelles applications des principes des écluses de navigation à colonnes liquides oscillantes, notamment pour les grandes chutes.

Ce n'est pas seulement dans les cas où l'on aurait à épargner de l'eau, si l'on employait des chutes ordinaires, que mon système sera applicable. Le général Poncelet avait, il y a longtemps, remarqué qu'il y aurait de l'avantage à employer des grandes chutes, si l'on avait un moyen d'épargner l'eau. M. le colonel Boileau, correspondant de l'Institut, a rappelé mon attention sur ce sujet, en me conseillant pour les grands tubes mobiles l'emploi des madriers de sapin du nord.

Dans beaucoup de circonstances, on pourra, sans dépenser plus d'eau que pour les chutes ordinaires, et même en en

dépensant moins, construire des écluses de chutes assez grandes pour permettre de modifier d'une manière importante le tracé d'un nouveau canal; on jouira de l'avantage de diminuer considérablement la durée du passage d'un bateau d'une extrémité à l'autre d'un canal, quand il y aura beaucoup d'écluses, et l'on aura à entretenir bien moins d'éclusiers.

Lorsqu'un bateau chargé, occupant presque toute la section d'une écluse, entre du bief supérieur dans le sas, il introduit dans ce bief une quantité d'eau qui peut ne pas différer beaucoup d'une éclusée. S'il remonte ensuite étant vide, il ne fait entrer de l'écluse dans le bief d'aval qu'une quantité d'eau beaucoup moindre quand il quitte ce dernier. Il résulte de ces considérations, comme l'a remarqué Girard, membre de l'Académie des sciences, que, si les écluses avaient des chutes assez petites par rapport au tirant d'eau des bateaux, un canal pourrait être considéré comme une machine à élever de l'eau dans certaines conditions. On conçoit les complications et les difficultés pratiques qui en résulteraient, combien la multiplicité des écluses serait dispendieuse, et combien cela augmenterait la durée de la navigation.

Mais depuis que la réussite d'un de mes systèmes d'écluses à colonnes liquides oscillantes a montré qu'on pouvait ne perdre qu'une petite fraction de l'éclusée, il devient intéressant d'appeler l'attention sur la possibilité de réaliser d'une autre manière une idée théorique oubliée depuis longtemps, ou regardée comme une récréation mathématique. Il est évident que, dans bien des circonstances, un grand bateau chargé qui ensuite remontera vide, aura en définitive fait entrer dans le bief supérieur une quantité d'eau beaucoup plus grande que celle qui est nécessaire pour faire fonctionner une écluse à colonnes liquides oscillantes.

Si, par exemple, on avait à exploiter des carrières au point le plus élevé d'un canal, sans être obligé de faire remonter des chargements aussi lourds, il suffirait à la rigueur de pou-

voir remplir ce canal une première fois pour faire fonctionner les écluses. On calculerait, d'après les pertes d'eau résultant des défauts des portes ou de l'appareil des filtrations et de l'évaporation, quel serait le poids des chargements qu'on pourrait faire remonter, le moteur résultant de la descente des matériaux extraits des carrières précitées. Il paraît même, d'après les renseignements que j'ai pu me procurer, que, dans certaines circonstances, si les bateaux remontaient toujours vides, et si la navigation était assez active, il ne serait pas absolument impossible de considérer un canal comme une véritable machine à élever de l'eau pour les irrigations. De sorte qu'il en résulterait même des courants qui empêcheraient l'eau de se corrompre. Si l'on peut, dans mon système, supprimer les ventelles des portes d'écluses, cela diminuera encore les pertes dont il fallait tenir compte. S'il paraît difficile d'attacher une importance pratique à cette idée, elle m'a paru mériter d'être signalée pour des circonstances d'ailleurs sans doute extrêmement rares.

Il est plus intéressant de remarquer que la possibilité de réduire à une petite fraction de l'éclusée la quantité d'eau, exigée jusqu'à présent par le passage des bateaux, permet de modifier les bases de certaines constructions. Ainsi l'on pensait depuis longtemps qu'il serait utile de ne pas faire les murs des bajoyers verticaux à l'intérieur des écluses. Mais le talus, s'il était bien sensible, était cependant réduit de manière à ne pas trop augmenter le volume de l'éclusée pour une section donnée du fond d'un sas. Cependant, d'après un renseignement qui m'a été transmis par M. de Lagrené, ingénieur en chef des ponts et chaussées, aux Etats-Unis d'Amérique on construit ces talus malgré l'augmentation de dépense d'eau qui en résulte. Or, si cela diminue le capital du premier établissement, il est juste d'en tenir compte dans le calcul de celui de l'appareil, qui permettra de faire cette économie dans la construction de l'écluse.

Dans le cas où les avis seraient partagés sur les avantages

pouvant provenir, soit de ce que les bajoyers sont en ligne droite, soit de ce qu'ils pourraient être construits en ligne courbe, d'une manière plus ou moins analogue à ce qui a été fait pour d'anciennes écluses, et si l'on n'avait plus à se préoccuper désormais des inconvénients qui résulteraient d'une augmentation de l'*éclusée*, on n'aurait plus qu'à étudier quel serait celui de ces deux systèmes de bajoyers qui coûterait le moins cher. Or, dans le cas où ce serait le bajoyer courbe, il serait juste d'en tenir compte dans le calcul de la dépense du premier établissement de l'appareil.

Je pourrais entrer dans d'autres détails ; mon but est seulement de montrer combien l'état de la question est changé si, dans des limites assez étendues, on peut choisir maintenant les modes de construction les moins coûteux, sans se préoccuper autant qu'on le faisait de l'augmentation des éclusées.

Précautions nécessaires pour apprécier le rendement.

A l'écluse de l'Aubois, la rigole de décharge a été transformée en bassin d'épargne qui, pour les dernières expériences, avait une section moyenne égale à environ les deux tiers de celle de l'écluse, comme je l'ai expliqué ci-dessus. Pour chaque période de vidange, il se produisait une onde se promenant d'une extrémité à l'autre de ce bassin. Afin d'obvier à cet inconvénient, on a disposé un brise-lames formé de moellons de $5^m,30$ de base sur $2^m,10$ de hauteur, contre un barrage en madriers qui servait à rétrécir la section de la rigole en diminuant sa longueur. Cela a suffi pour amortir assez convenablement les ondes. Il eût d'ailleurs été facile de les amortir plus complètement en allongeant ce brise-lames. Mais ce détail est très secondaire, parce qu'il vaudrait mieux en général, ainsi que je l'ai expliqué ci-dessus, avoir

un bassin d'une autre forme, quand il ne devra pas communiquer alternativement avec le bief inférieur.

Je vais donner quelques détails sur les ondes qui se présentent pendant la vidange de l'écluse. J'ai déjà parlé de celles qui se présentent pendant le remplissage. Les observations suivantes ont été faites avant la pose du barrage précité. Je crois utile d'en conserver quelques détails. Quand on vide l'écluse de l'Aubois au moyen de l'appareil de mon invention qui y est construit, l'eau contenue dans les deux tubes verticaux au-dessus du niveau d'aval tombe dans la rigole de décharge, où elle produit une onde *solitaire*. A la période suivante, l'onde *solitaire*, résultant de ce qu'il descend de l'eau de ces tubes quand on soulève celui d'aval, est déjà moins forte que pour la première période, la quantité d'eau qui produit cette onde étant diminuée par l'oscillation en retour. Aux périodes suivantes, l'onde *solitaire* dont il s'agit est de moins en moins forte, à mesure que les oscillations en retour diminuent la quantité d'eau, qui doit ainsi tomber dans la rigole de décharge à l'instant où on lève le tube d'aval. Il ne se produit même plus d'onde *solitaire* bien sensible provenant de cette cause, à partir de l'époque où l'oscillation en retour descend assez bas pour vider les tubes verticaux à peu près jusqu'au niveau de l'eau du bief d'aval.

Il ne faut pas confondre les premières ondes dont il s'agit avec celles qui peuvent provenir ensuite de l'écoulement de l'eau de l'écluse dans le canal de décharge, supposé en communication avec le bief inférieur. Cet écoulement n'est pas du tout d'ailleurs de la même nature que celui au moyen duquel Bidone a introduit un courant sur un canal rempli d'eau en repos. A l'écluse de l'Aubois, l'eau partant du repos dans un grand tuyau de conduite, prend graduellement de la vitesse; de sorte qu'en se superposant à l'eau, d'aval, elle ne présente pas de surfaces de formes analogues à celles qui ont été observées par Bidone à l'extrémité du courant qu'il jetait sur de l'eau en repos.

J'ai même exagéré les effets du phénomène, en ne laissant quelquefois qu'une très petite profondeur d'eau dans la rigole de décharge et tenant le tube d'aval levé bien plus longtemps qu'il ne doit l'être dans les manœuvres de l'appareil. Quand on fermait la porte de flot de la rigole de décharge, afin d'étudier cette rigole comme bassin d'épargne, il se présentait des effets dont il faut d'abord apprendre à se débarrasser. L'onde *solitaire*, résultant, comme je l'ai déjà dit, de la descente de l'eau contenue dans les tubes verticaux, allait frapper l'autre extrémité du bassin d'épargne, d'où elle revenait dans la chambre du tube d'aval. Or, il arrivait souvent qu'elle y gonflait l'eau précisément à l'époque où ce tube était levé; de sorte que cela diminuait la différence de hauteur entre le niveau de l'eau dans l'écluse et cette eau d'aval. Il pouvait même en résulter que l'écoulement de l'eau de l'écluse augmentât le volume de l'onde dont il s'agit, tandis que celle-ci devrait diminuer, comme je l'ai expliqué ci-dessus, à mesure que les oscillations en retour augmentent. Il résultait même de cette combinaison d'effets que des ondes assez puissantes pouvaient se promener d'une extrémité à l'autre du bassin d'épargne et diminuer le rendement d'une manière sensible. Le brise-lames évite cet inconvénient.

Lorsqu'on remplit ou qu'on vide le sas, en levant alternativement les tubes mobiles, abstraction faite des grandes oscillations initiales et finales, il ne se présente pas dans l'écluse de phénomènes analogues à ceux qui ont été observés par Bidone, dans le cas où il introduisait ou interrompait un courant d'une manière brusque. La vitesse de l'eau, qui entre ou sort partant de zéro dans le tuyau de conduite, y augmente graduellement et y redevient graduellement nulle. Mais, s'il n'y a pas de vagues bien apparentes, il y a successivement aux deux extrémités de l'écluse des exhaussements graduels très sensibles de la surface liquide. Ainsi, même pour la vidange, on conçoit que la vitesse finissant par diminuer dans le tuyau de conduite, celui-ci ne peut plus donner passage à

toute l'eau en mouvement dans le sas, de sorte qu'il en résulte un gonflement.

Plus il y a d'eau dans le sas pour une dénivellation de ce genre d'une hauteur donnée, moins cela doit imprimer de vitesse alternative à la masse d'eau inférieure dans le sens de l'axe de l'écluse. On conçoit d'après cela pourquoi, en supposant même toutes choses égales d'ailleurs, il est intéressant, pour diminuer les chances d'oscillation des bateaux, de se servir des grandes oscillations initiales et finales. Il sera même convenable d'en exagérer un peu l'emploi, d'autant plus que les dernières périodes de l'appareil de vidange, relevant peu d'eau relativement aux premières, peuvent être supprimées avec quelques avantages, probablement même quant au rendement, à cause de l'augmentation que cela permet de donner à la grande oscillation finale de vidange, tout en abrégeant la durée de l'opération complète.

Comme on pourra désormais faire entrer l'eau dans une écluse ou la faire sortir par les deux extrémités de celle-ci, les études relatives à un bassin d'épargne auront moins d'importance. Mais, à l'écluse de l'Aubois, le tuyau de conduite ne débouche qu'à une des extrémités, et l'on ne pouvait pas, pour éviter les mouvements de va-et-vient des bateaux, prendre toutes les précautions dont j'ai parlé ci-dessus, les enclaves des échelles métalliques étant, comme je l'ai dit, de trop petites sections. Il était donc plus intéressant qu'il ne le serait pour une écluse neuve d'étudier les grandes oscillations initiales et finales qui, permettant de diminuer le nombre des périodes, donnent un moyen très simple d'éviter aux bateaux des mouvements qui exigeaient avant cela une certaine attention pour lâcher ou resserrer les cordages. Je dois dire que M. Poulet, ingénieur des ponts et chaussées, qui a eu l'obligeance de s'occuper d'expériences sur cette écluse, m'a toujours engagé à voir si je pourrais disposer les choses de manière à ménager des *matelas* d'eau, soit sous les bateaux, soit dans des chambres latérales.

Je ne me dissimule pas au reste les inconvénients des bassins d'épargne, malgré la simplification qui en résulte pour les manœuvres de l'appareil. Aussi, je n'ai pas proposé de barrer la rigole de décharge au moyen d'un mur, quoique cela eût été bien plus convenable pour mesurer le rendement qu'un barrage à poutrelles donnant lieu à beaucoup de filtrations.

L'appareil dont il s'agit ayant pour but des études dans une localité où l'on n'a pas besoin d'épargner de l'eau, il était intéressant de disposer les choses de manière à pouvoir varier les expériences. Mais, dans l'état où il est, je dois montrer d'après quelles bases on peut apprécier l'effet des filtrations, qu'il aurait été facile d'éviter, si au lieu d'un barrage provisoire on avait employé un mur. M. Vallès a d'ailleurs remarqué que les maçonneries de la rigole de décharge, n'ayant pas été faites d'abord en vue d'un bassin d'épargne exhaussé comme il l'est aujourd'hui, ne gardaient pas l'eau aussi bien qu'elles le feraient pour une autre application du système.

Les expériences qu'il a faites en 1879, et dont on trouve les principaux résultats dans les Annales des ponts et chaussées, ne peuvent pas, comme je l'ai expliqué ci-dessus, donner un rendement aussi élevé que si l'on avait adopté la disposition des coudes de la planche VI, avec un tuyau de conduite d'une longueur suffisante. D'ailleurs, le chapitre de son rapport relatif aux filtrations n'ayant pas été publié, quelques explications me paraissent indispensables pour compléter l'exposition des principes.

M. Vallès avait commencé par faire des observations d'où il a conclu que les pertes du bassin d'épargne ne venaient pas de l'appareil, en un mot, que le tube d'aval n'occasionnait aucune filtration sensible pendant toutes ses observations sur ce sujet, l'appareil ne marchant pas.

Il a ensuite mesuré, l'appareil ne marchant pas non plus, les durées des abaissements du niveau de l'eau dans le bas

sin d'épargne, rempli à diverses hauteurs; puis les durées des exhaussements du niveau dans le même bassin quand on l'avait fait (au moyen de la machine arrêtée ensuite) descendre à sa limite inférieure. Il s'est présenté en définitive un résultat assez singulier. Quand le bassin d'épargne avait été rempli autant qu'il pouvait l'être par l'appareil, la perte qui résultait des filtrations n'était pas compensée, il est vrai, par la rentrée de l'eau lorsque le niveau était ensuite descendu dans le bassin au-dessous du niveau du bief d'aval; il remarque cependant qu'elle l'était assez pour que la différence fût de peu d'importance. Il pourrait donc sembler au premier aperçu que les filtrations ne changeaient pas le rendement de la machine, parce qu'on faisait rentrer dans l'écluse une quantité d'eau ne différant pas beaucoup de celle qu'on avait trouvée après la vidange du sas dans le bassin d'épargne. Cela résulte de la manière dont on avait, pour ces observations, disposé au moyen d'une porte de flot le niveau de l'eau en aval du barrage.

Cette manière de considérer les choses offre un certain intérêt parce que, en mesurant ainsi le rendement, on est sûr de l'apprécier au-dessous de sa véritable valeur, ce qui est en général intéressant pour la pratique. Mais il est essentiel de montrer comment on se tromperait au désavantage de l'appareil, si l'on se contentait de ce moyen d'interpréter les résultats.

Lorsque le bassin d'épargne renferme de l'eau au-dessus du niveau du liquide en aval du barrage, la perte de rendement résultant des filtrations est d'autant plus évidente que, le niveau baissant au sommet du bassin d'épargne, la quantité de travail dépensée par cette cause est en pure perte. Je suppose qu'on vide ensuite l'écluse, après avoir abaissé, par le jeu de l'appareil, le niveau de l'eau du bassin d'épargne au-dessous de celui du liquide au-delà du barrage provisoire à poutrelles. Les filtrations faisant monter l'eau dans ce bassin, et l'ayant même fait déjà monter avant l'emploi de l'ap-

pareil de vidange, diminuent la chute motrice disponible entre l'eau de l'écluse et le niveau inférieur variable dont il s'agit.

Pour le remplissage du sas, il rentrera moins d'eau dans l'écluse, si le niveau a été baissé par suite des filtrations de dedans en dehors du bassin d'épargne. Pendant la vidange, on relèvera moins d'eau que si la chute moyenne n'était pas diminuée, parce que, dans le bassin d'épargne, le niveau est remonté par suite des filtrations en sens contraire. Il faut ajouter aux considérations résultant des observations directes faites sur la baisse de l'eau, quand l'appareil ne marchait pas, celle de l'effet des filtrations pendant le jeu du système.

Je suppose qu'on admette, d'après les observations précitées, qu'une quantité d'eau assez sensiblement égale à celle qui est entrée pendant la vidange dans le bassin d'épargne est rentrée dans l'écluse pendant le remplissage. Il est clair que la quantité d'eau perdue en définitive est égale à celle qui reste dans l'écluse après la vidange qui suit un remplissage. On a d'ailleurs un moyen de contrôle. Quant à l'effet des périodes de la machine pendant la vidange, si l'on connaît la quantité d'eau sortie de l'écluse et celle qui est entrée dans le bassin d'épargne pendant le jeu de ces périodes, on n'a qu'à faire une soustraction pour trouver la fraction de l'éclusée relevée au bief supérieur. Au commencement du remplissage, une grande oscillation rejette dans l'écluse une tranche d'eau dont la hauteur est très facile à mesurer. Pour trouver la quantité d'eau relevée du bassin dans l'écluse pendant les périodes de remplissage, il suffit de mesurer, après le jeu de ces périodes, l'abaissement du niveau dans le bassin d'épargne dont on connaît les sections.

Ce moyen de contrôle ne serait tout à fait exact que s'il n'y avait pas de filtrations dont on peut d'ailleurs se rendre compte. Quant à celles de l'écluse, lorsqu'elle était pleine, les portes restant fermées et les tubes restant baissés, il se perdait un peu plus d'eau qu'il n'en entrait. Son niveau est descendu de $1^{m},12$ en une heure. D'après ce qu'a dit l'éclusier, le niveau

du sas finissait par descendre assez près de celui du bief d'aval. En définitive, les pertes d'eau provenant des portes ne paraissent avoir eu qu'une influence secondaire sur la diminution du rendement. Aussi le rapport de M. Vallès n'en a pas tenu compte. Je n'en parle que pour compléter l'exposition des principes, en signalant cette cause de diminution dans le rendement de l'appareil.

On a moins de mesures délicates à prendre quand, pour chercher la somme des deux quantités épargnées par les périodes, on retranche de l'éclusée l'eau rentrée par la grande oscillation de remplissage, plus celle qui restera dans le sas après la vidange.

Lorsque l'appareil ne marche pas on assure au besoin l'adhérence de chaque tube mobile sur son siège au moyen d'un appareil appelé *compresseur*. Deux branches horizontales tournant chacune autour d'un axe fixe viennent se poser sur le sommet du tube au moyen d'un système d'articulations. Un levier agit en même temps ensuite sur ces deux branches et les fait appuyer sur ce sommet. On met alors une cheville au-dessous de l'extrémité du bras de levier sur lequel on a exercé une pression. Ce *compresseur* a très bien réussi, et l'on s'en est servi notamment pendant les diverses expériences sur les filtrations.

Je n'en donne pas ici les dessins qu'on pourra d'ailleurs voir en détail dans le tome III du *Cours de navigation* de M. de Lagrené. Ce n'est pas moi qui ai proposé cette combinaison ingénieuse de leviers articulés. Elle a été construite par l'administration du canal. Je la trouve un peu compliquée et j'ai lieu d'espérer qu'il suffira, pour atteindre le même but d'une manière bien plus simple, d'agir de bas en haut sur le grand bras du balancier de chaque tube. Ce dernier sera ainsi, non-seulement abandonné à son propre poids, mais pressé de haut en bas au moyen de deux tiges verticales qui lui seront attachées et seront réunies par une barre sur laquelle l'autre extrémité du balancier viendra s'appuyer. Mais

il faudra que la pièce verticale, portant l'axe du balancier, soit assez fortement attachée pour ne pouvoir être soulevée par l'effort que l'éclusier fera de bas en haut sur cet axe, avant d'accrocher convenablement l'extrémité du grand bras du balancier. Il ne s'agit d'ailleurs que d'un détail d'exécution sans difficulté, relatif à une manœuvre dont on n'aura à se préoccuper qu'aux époques où chaque tube ne fonctionnera pas.

Pour cette manœuvre, il ne sera pas même nécessaire que l'éclusier se dérange, il n'aura qu'à tirer en temps utile de bas en haut l'extrémité du grand bras de levier à l'aide d'une poulie fixe, comme il le fait pour faire baisser alternativement un tube à l'époque du remplissage.

Je remarquerai, avec M. Vallès, qu'au moyen d'un seul poteau on pourra faire fonctionner les deux tubes en se servant aussi de poulies fixes pour une autre application, quand on aura placé, comme je l'ai proposé, les balanciers de manière que les extrémités de leurs grands bras soient assez près l'une de l'autre. Dans un premier essai sur une si grande échelle, on a pu trouver plus prudent de ne pas les mettre près l'une de l'autre, afin d'éviter les embarras qui se seraient sans doute présentés dans l'étude de manœuvres, reposant sur des phénomènes très puissants et très peu connus. Un seul arbre ou poteau posé entre les extrémités des grands bras du balancier sera suffisant ; il portera deux poulies fixes, l'une pour le tube d'amont sur une de ses faces, l'autre sur la face opposée pour le tube d'aval.

On trouve dans la partie publiée du rapport de M. Vallès, chapitre quatrième, des tableaux d'expériences au moyen desquelles on peut se former une idée des filtrations quand l'appareil ne marchait pas. Chaque expérience de vidange y étant presque toujours suivie d'une expérience de remplissage, on voit de combien le niveau est descendu dans le bassin d'épargne, entre la fin de la grande oscillation de vidange et le commencement de celle de remplissage. Cette différence est souvent d'environ 0^{m}10. On voit sur ces mêmes tableaux

de combien, à cause des filtrations, l'eau est montée dans le bassin d'épargne depuis l'instant où les périodes de l'appareil de remplissage ont cessé de fonctionner, jusqu'au moment où les périodes de vidange ont commencé. Cette différence est souvent aussi de 0m10 environ.

Mais il y a une perte qui ne peut être immédiatement déduite de ces tableaux. Elle provient des filtrations de l'eau pendant toute la durée de la marche de l'appareil, en y comprenant celle des grandes oscillations initiales et finales. D'après un tableau qui se trouve dans la partie inédite du rapport de M. Vallès, cette perte ne paraît pas être moindre que la moitié environ de la somme des deux autres. Il ne s'agit d'ailleurs que d'une appréciation très provisoire, d'autant plus qu'on ne sait pas comment sont distribués les petits orifices donnant lieu aux filtrations, et que les durées des époques pendant lesquelles agissent les diverses hauteurs de l'eau de chaque côté du barrage ne sont pas déterminées d'une manière précise. Mais, sans exagérer l'importance de ces approximations plus ou moins incertaines, on voit qu'elles suffisent pour montrer qu'avec un bassin d'épargne convenablement étanché on aurait eu, pour des chutes d'écluse de 2m,40 à 2m,60 un rendement notablement plus élevé que celui qui a pu être mesuré par les moyens directs indiqués cidessus.

En appliquant le calcul d'après ces diverses considérations on trouve que le chiffre de 55 pour cent, adopté provisoirement en moyenne, mais comme un minimum, par M. Vallès, à cause de l'état de l'appareil, pour le rapport de la quantité d'eau épargnée à celle d'une éclusée totale dans ces conditions, ne doit être sensiblement exact que pour l'état actuel d'imperfection du barrage à poutrelles, des maçonneries, etc. Un résultat minimum d'expériences faites avec beaucoup de soin n'en est pas moins important à recueillir. Mais il est juste de remarquer de quelle manière on doit l'interpréter, pour le cas où l'on aurait un bassin d'épargne convenable-

ment établi. Il faut tenir compte de ce que, par suite de circonstances exceptionnelles, on a été obligé d'exhausser un des deux tubes mobiles, comme je l'ai expliqué ci-dessus, et de ce que, aussi depuis les premières expériences de M. Vallès, on a rétréci un peu la section du siège du tube d'aval. Cela a été nécessaire pour disposer à son intérieur un anneau qui, par suite d'un malentendu, avait été mis extérieurement. Il paraît cependant que la combinaison des périodes de l'appareil avec le jeu du bassin d'épargne ne doit pas pouvoir augmenter beaucoup le rendement obtenu seulement au moyen des périodes, tout en ayant l'avantage de simplifier les manœuvres, jusqu'à ce qu'on ait posé, pour une autre construction, le coude arrondi sous le tube d'aval (1).

Je n'attache qu'une importance secondaire aux expériences faites en combinant les périodes de l'appareil avec un bassin d'épargne, d'ailleurs dans de très mauvaises conditions. Je crois qu'il vaudra mieux, en général, faire déboucher le tuyau de conduite aux deux extrémités d'une écluse, ainsi que cela

(1) L'extrait suivant du dernier rapport de M. Vallès évitera tout malentendu relativement à la nature des filtrations qui ont eu de l'influence sur la mesure du rendement. Je le présente comme pièce justificative, après avoir expliqué plus haut les précautions prises pour ce genre d'observations :

« ..... Un point sur lequel il était très important de s'éclaircir parce « qu'il intéresse à un haut degré la constitution même de la machine, « c'était celui de savoir si les déperditions de liquide que subit le bas- « sin d'épargne doivent être attribuées, non en entier, mais pour une « part notable, à un défaut d'étanchéité qu'on pourrait s'imaginer être « à peu près inévitable dans l'appareil.

« Nous pouvons affirmer que, d'après nos expériences, ce défaut « n'existe pas à l'Aubois, malgré toutes les difficultés naturelles de « cette localité, malgré les remaniements qu'y a subis l'appareil, il n'y « a pas de fuites sensibles entre celui-ci et l'écluse et réciproquement.

« En effet, pour nous éclaicir à ce sujet, pendant que les expériences « dont nous venons de donner le tableau s'exécutaient, nous avons, « à plusieurs reprises, fait remplir et vider l'écluse et nous allons faire « connaître la série caractéristique des faits que nous avons ob- « servés..... »

a été expliqué ci-dessus et mentionné d'ailleurs dans le rapport de M. Vallès. On ferait la manœuvre comme dans ses premières expériences, sur lesquelles je reviendrai plus loin. Mais celles qu'il a faites, en combinant le jeu de l'appareil avec un bassin d'épargne à sections retrécies, ayant été publiées dans les *Annales des ponts et chaussées*, je vais ajouter, pour éviter tout malentendu, quelques détails sur la manière de les interpréter.

A cause des filtrations dont j'ai indiqué la nature ci-dessus, et qui ne doivent pas être attribuées à l'appareil, quand on a commencé la vidange de l'écluse, le niveau dans le bassin d'épargne était en général notablement au-dessus de celui du bief d'aval. Il aurait été notablement au dessous, si l'eau n'y était pas rentrée par le mauvais barrage à poutrelles. On peut se demander s'il ne serait pas convenable de considérer la chute motrice comme diminuée à cause de l'exhaussement dont il s'agit.

Mais cela donnerait lieu à des difficultés, parce que, pour le remplissage, on trouverait ensuite dans l'écluse le niveau descendu à la hauteur de celui du bief d'aval. Il vaut donc mieux, quoique cela soit au désavantage de la machine, commencer par prendre pour chaque expérience la chute telle qu'elle est réellement. Si l'on admet, d'après ce qui a été dit ci-dessus, que toute l'eau rejetée dans le bassin d'épargne rentre à peu de chose près dans l'écluse pendant le remplissage, il n'y aura en définitive de perdu que ce qui restera dans le sas, pendant la vidange, quand la grande oscillation de décharge sera finie. C'est le résultat brut qu'il s'agit d'interpréter. Il est par lui-même intéressant au point de vue de la pratique, comme limite inférieure à la véritable, l'épargne dépassant toujours, même étant évaluée par ce moyen, la moitié de l'éclusée, quoiqu'on soit dans d'aussi mauvaises conditions.

Si l'on trouve, dans le bassin dont il s'agit, le niveau au-dessus de celui du bief inférieur, pour la première vidange,

on peut admettre que la quantité d'eau épargnée aurait été augmentée sensiblement dans le rapport de la hauteur du niveau d'amont au-dessus de celui d'aval (ces deux niveaux étant provisoirement supposés constants), à la hauteur du niveau d'amont au-dessus de celui du bassin d'épargne au commencement de la vidange. Lorsque ensuite, dans l'intervalle de deux opérations de vidange et de remplissage, il est descendu de l'eau de ce bassin par les filtrations, on peut admettre que la quantité qui rentrera dans l'écluse sera diminuée sensiblement, dans le rapport de ce qui reste de hauteur d'eau dans ce bassin à ce qu'on y aurait trouvé sans les filtrations.

Or, il faut de plus tenir compte de ce que, pendant toute la durée, soit de l'opération de vidange, soit de celle du remplissage, il y a eu des filtrations qu'il est, comme je l'ai dit, assez difficile d'apprécier. Elles sont d'ailleurs importantes par rapport à celles dont je viens de parler, ainsi que je l'ai expliqué ci-dessus. Malgré toutes ces imperfections, il est très souvent arrivé que le niveau est descendu dans le bassin d'épargne bien au-dessous de celui du bief inférieur. Par conséquent, toute vidange faite après une baisse normale dans ce bassin aurait épargné notablement plus d'eau que la première de toutes les opérations de vidange, si, en vertu des filtrations indépendantes de l'appareil, le niveau n'était pas au contraire remonté dans le bassin d'épargne au-dessus de celui du bief d'aval.

J'ai seulement eu pour but, dans ce qui vient d'être dit, de donner une idée des moyens dont on peut se servir pour apprécier les tableaux des dernières expériences de M. Vallès. Sans ces explications, un chapitre de son dernier rapport relatif aux filtrations n'ayant pas été imprimé, on ne comprendrait peut-être pas assez complètement le sens de ce qu'il a dit, dans la partie publiée, sur la manière dont se compensent les filtrations du bassin d'épargne, de dedans en dehors et de dehors en dedans.

J'ai oublié de dire que, dans les comparaisons entre les dernières expériences de M. Vallès et celles qu'il a faites en 1868, sur lesquelles je donnerai plus loin des détails, il faut tenir compte de ce que, en 1879, les freins hydrauliques ayant été posés sous l'extrémité des grands balanciers, cela diminuait la levée des tubes mobiles. Il serait facile de les disposer assez loin de ces extrémités pour ne pas diminuer la levée des tubes, et même pour permettre de l'augmenter en creusant un peu le sol.

Je dois ajouter une remarque beaucoup plus importante relativement à l'application du système aux grandes chutes. On sait, en effet, que ce n'est pas seulement à cause de la dépense d'eau qu'on évite d'employer les grandes chutes pour les écluses. C'est aussi parce qu'il faut tenir compte des dégradations occasionnées dans les maçonneries par les vitesses considérables de l'eau. Or, il est bien à remarquer que, dans mes systèmes, les choses peuvent être disposées de manière que les vitesses, partant de zéro, augmentent graduellement dans des sections si considérables que cela change complètement l'état de la question. Aussitôt qu'on levait les ventelles pour les grandes chutes dans le service ordinaire des écluses, il se produisait des vitesses considérables qui pouvaient être dangereuses pour les maçonneries.

Or, avec mes systèmes, on a des moyens pratiques et simples d'ouvrir de grands orifices, tout en modérant les vitesses en vertu de l'inertie des longues colonnes liquides. Il y aura bien encore des vitesses assez grandes, mais seulement pendant quelques instants, lorsqu'à l'époque de la vidange du sas l'eau tombera des tubes verticaux au bief d'aval dans les premières périodes, et quand à l'époque du remplissage l'eau tombera du bief d'amont pour les premières périodes dans les mêmes tubes, du moins lorsqu'on n'emploiera pas de bassin d'épargne. J'ai d'ailleurs indiqué un moyen d'atténuer et presque de supprimer les effets dont il s'agit, dans le chapitre relatif à la manière de faire au besoin conduire les deux

tubes l'un par l'autre. Il y aura même lieu de voir si cette disposition ne sera pas la plus convenable pour les grandes chutes, à cause des considérations dont je viens de parler.

Expériences faites à Cherbourg sur des coudes analogues à ceux qui sont employés à l'écluse de l'Aubois.

J'ai indiqué dans le chapitre relatif aux formes des extrémités du grand tuyau de conduite, la marche générale des résultats les plus essentiels de ces expériences, sur lesquelles je vais donner quelques détails. On pourra mieux se rendre compte de la manière dont les résultats des dernières expériences de M. Vallès auraient pu être modifiés si le coude arrondi avait été disposé sous le tube d'aval.

J'ai dit, page 378 de la première partie, qu'il me restait quelques doutes sur la manière d'interpréter des résultats obtenus par S'Gravesande et Venturi. J'avais lieu de présumer, d'après mes anciennes expériences, que le coefficient de la résistance de l'eau, dans leurs coudes à angle droit brusque, dépendait de diverses conditions dont ils ne s'étaient pas occupés, notamment de la longueur de la partie du tuyau en aval du coude, j'avais trouvé des coefficients de résistance bien moindres que ceux qui résultaient de leurs expériences. J'ai donc proposé à M. Bertin de refaire et de varier les observations de ce genre. Elles ont été faites à Cherbourg, sous ma direction, par un contre-maître expérimenté. Comme je ne les ai pas toutes vérifiées, je ne peux les présenter qu'avec une certaine réserve. Mais après les avoir discutées, je crois qu'on peut avoir confiance dans les résultats les plus essentiels, sauf quelques anomalies sans importance pouvant résulter d'erreurs, d'ailleurs très petites, dans la mesure des diamètres.

J'ai reconnu qu'en effet, il était beaucoup plus important que Venturi ne semble le croire, de préciser relativement à son diamètre, ce qu'il n'a pas même indiqué, la longueur de la partie du tuyau dont il s'agit. Quand cette longueur est trop courte, la couleur de la partie de la veine qui *s'écrase* dans le coude est très différente de celle qui coule du côté de ce qu'on pourrait appeler : la partie convexe. La première est très limpide, la seconde est beaucoup plus blanche, en un mot, le courant se divise en deux parties bien distinctes. On devait le prévoir d'après ce qui se présente dans des circonstances analogues, pour un canal découvert à angle droit brusque, où l'on voit les effets de l'*écrasement* de la veine liquide.

Il résulte des principes de Borda, sur l'action d'une veine liquide qui, à la sortie d'un étranglement, frappe une colonne d'eau en aval, qu'il devait être très différent d'avoir, en aval des coudes précités de S'Gravesande et de Venturi, un tuyau très court ou un tuyau d'une longueur suffisante, pour bien recevoir les effets de la percussion de la veine écrasée qui se dilate après sa sortie du coude. On ne voit plus alors de différence de couleur dans le jet qui sort horizontalement dans l'air, et le débit est beaucoup plus grand que dans l'autre cas, le phénomène étant analogue à celui des ajutages cylindriques sur une veine *contractée* ordinaire.

Ces considérations trouvent une application immédiate dans l'étude de mon système d'écluses de navigation, comme je l'ai expliqué plus haut. Ce n'est pas seulement d'ailleurs pour les coudes à angle droit brusque que l'influence de la longueur du tube d'aval se fait sentir, de sorte que cet ensemble d'expériences sur les coudes confirme, d'une manière intéressante et plus générale qu'on ne l'avait encore fait, le principe précité de Borda; il paraît juste au reste de le compléter en tenant compte, comme je l'ai dit, de ce que la dilatation de la veine liquide ne peut pas se faire d'une manière tout-à-fait brusque.

La résistance ne paraît pas rigoureusement proportionnelle aux carrés des vitesses moyennes. Cependant les expériences ne sont pas encore assez nombreuses pour qu'on puisse dégager des anomalies les lois de cette variation qui, si elle est bien réelle, semble d'ailleurs sans importance pratique pour l'étude relative aux écluses. Mais enfin c'est une raison de plus pour employer une méthode dont du Buat s'est servi pour les coudes arrondis qu'il a étudiés. On commence par voir quelle est la hauteur de l'eau dans un réservoir, à niveau sensiblement constant, pour laquelle, dans un tuyau rectiligne, de dimensions arrêtées et ayant une origine d'une forme déterminée, on obtient dans un temps donné le même débit qu'avec divers coudes.

Conservant toujours cet ajutage d'entrée, la même longueur développée de l'axe du tuyau et le même diamètre intérieur, on substitue successivement divers tuyaux coudés à celui qui est rectiligne. On détermine, pour chacun d'eux, quelle est la quantité dont il faut augmenter la hauteur de l'eau dans le réservoir afin d'obtenir le même débit dans un temps donné, en un mot, pour avoir dans tous les cas une même vitesse moyenne. Il résulte de cette méthode que, sans faire aucun calcul, on trouve immédiatement la valeur de la résistance dans tous les coudes, en jouissant d'un avantage précieux pour ce genre de recherches. En effet, on conserve autant que possible les autres résistances qui existaient pour le tuyau rectiligne.

Du Buat n'a pas dit si les coudes qu'il employait étaient disposés en amont ou en aval de la partie rectiligne. Cela n'avait, sans doute, pas beaucoup d'importance pour les coudes très arrondis, mais devait en avoir, comme on le verra plus loin, relativement à ceux qui l'étaient assez peu pour que le courant ne fût pas suffisamment rejeté vers l'axe. Quant aux coudes de Venturi, ils étaient disposés à l'extrémité d'aval du tuyau. Or, cette disposition change l'état de la question d'une manière importante. Il est bien entendu, pour tous les

coudes dont il s'agit, que les axes sont toujours posés horizontalement.

Le réservoir dont on s'est servi à Cherbourg a une section carrée de $1^m,27$ de diamètre intérieur. Les tuyaux rectilignes ou coudés ont un diamètre intérieur de $0^m,03$ et plusieurs ont une même longueur de $0^m,3$, ils sont tous en cuivre. La forme de l'ajutage attaché au réservoir n'avait qu'une importance secondaire relativement aux recherches comparatives dont il s'agit. En effet, c'était le même qui était employé pour tous les tubes, et l'on disposait, pour beaucoup d'expériences, les choses de manière à faire des comparaisons pour des vitesses moyennes toujours les mêmes dans les divers cas observés, selon la méthode précitée de du Buat.

Au reste, voici les dimensions de cet ajutage qui était assez loin d'être parfait, mais dont on s'est servi parce qu'il était posé d'avance, ayant été employé à des expériences sur d'autres phénomènes d'écoulement. La longueur de cet ajutage convergent était de $0^m,05$, il était formé par la révolution autour de l'axe d'un quart de circonférence de cercle ayant un rayon de $0^m,05$. Cette courbe était d'ailleurs tangente à l'arête de l'origine du tuyau de $0^m,03$ de diamètre.

Une caisse contenant une capacité de 400 litres était remplie en 150 secondes par le tuyau rectiligne de $0^m,30$ de long, la charge étant d'un mètre au-dessus de l'arête inférieure. C'est toujours au-dessus de cette arête que les charges ont été mesurées dans les expériences faites à Cherbourg, à cause de la facilité que cela donnait à l'observateur quant à la détermination de la limite d'une manière suffisante pour le degré d'approximation dont on avait besoin. On laissait écouler l'eau jusqu'à l'arête inférieure dont il s'agit, c'est toujours la même capacité de 400 litres qui a été remplie en vertu de l'écoulement dans toutes les expériences. Un assez gros tube de verre s'élevant jusqu'au sommet de la cuve servait à mesurer la hauteur de la charge.

Le débit ne changeait pas pour la même charge d'eau

quand on substituait à ce tube rectiligne un tube coudé en arc de cercle, toujours de même diamètre intérieur et de même longueur développée, le rayon moyen de courbure étant de $0^m,15$. Mais il fallait une charge d'eau de $1^m,70$ pour obtenir le même débit en 150 secondes, avec un tuyau coudé à angle droit brusque, la longueur de l'axe de chaque partie du coude étant de $0^m,15$, de sorte que la longueur totale développée de l'axe était égale à celle du tuyau rectiligne. Ainsi pour les vitesses moyennes correspondantes à ces conditions, la résistance du coude est exprimée par une charge d'eau de $0^m,7$.

On a ensuite pris un coude à angle droit brusque dont la première partie avait la même longueur que celle du coude précédent, c'est-à-dire $0^m,15$ depuis son origine jusqu'à l'axe de sa seconde partie, celle-ci ayant une longueur double de la première. Pour une charge de $1^m,25$ au-dessus de l'arête inférieure, on a rempli en 200 secondes la caisse de jaugeage (toujours la même pour ce chapitre et contenant 400 litres), soit que la partie la plus courte fût adaptée à l'ajutage, soit que ce fût la partie la plus longue.

Mais il n'en a plus été ainsi quand on a coupé la partie la plus longue, en ne lui laissant que $0^m,015$ au-delà de l'arête la plus courte de la première partie, ce qui faisait $0^m,030$ depuis l'axe de celle-ci. Lorsque c'était la partie la plus courte qui était adaptée à l'ajutage, avec une charge d'un mètre d'eau, toujours sur l'arête inférieure, on remplissait en 200 secondes la caisse de jaugeage précitée, tandis qu'il fallait une charge de $1^m,70$ pour la remplir lorsque c'était la partie la plus longue qui était posée contre l'ajutage.

Ainsi il y avait encore plus de différence entre les résistances dans ces deux cas, qu'entre les résistances dans le premier tube coudé et le tube rectiligne. La différence, il est vrai, est encore ici représentée par une hauteur d'eau de $0^m,7$, mais la vitesse moyenne était seulement les trois quarts de la première. On voit qu'il y a une très grande différence dans le

rapport de la résistance à la *hauteur due* à la vitesse moyenne. Dans ce second cas, la résistance est plus grande qu'on ne la trouverait en faisant le calcul d'après l'expérience de Venturi, si l'on comparait le débit de son tuyau rectiligne avec celui de son tuyau coudé à angle droit brusque. Mais il faut remarquer qu'il n'a pas indiqué la longueur de la seconde partie du coude.

On a ensuite comparé le débit d'un coude à angle droit brusque, l'axe de chaque partie rectiligne ayant une longueur de $0^m,15$, avec un coude du genre de ceux en forme de T dont toutes les branches étaient horizontales, qui ont été étudiés par S'Gravesande. L'étude de cette espèce de coude etait très importante pour celle d'un de ceux de la planche VI qui est précisément en forme de T. C'est celui qui est représenté sous le tube d'amont et qui est sous le tube d'aval à l'écluse de l'Aubois. La première moitié de la *barre* du T simulant un des axes avait une longueur de $0^m,15$, ainsi que la seconde moitié, celle-ci était bouchée, comme dans les expériences de S'Gravesande. La partie perpendiculaire du T, simulant l'axe du tube de sortie, avait aussi une longueur de $0^m,15$. Ces deux espèces de coude ont donné le même résultat. La caisse de jaugeage a été remplie dans les deux cas en 200 secondes pour une charge d'un mètre. On a réduit la partie perpendiculaire à la barre précitée à $0^m,10$ avec la charge d'un mètre toujours sur l'arête inférieure, on a encore obtenu le même résultat, soit que la première extrémité fût adaptée à l'ajutage, soit que l'extrémité par où l'eau était sortie dans l'air fût posée contre cet ajutage.

On a pris ensuite un tuyau de $0^m,30$ de long dont une extrémité était coudée, non plus d'une manière brusque, mais avec un rayon d'arrondissement intérieur égal au diamètre du tuyau. Quand l'extrémité coudée était adaptée à l'ajutage, une charge de 0^m70 suffisait pour remplir la caisse de jaugeage contenant toujours 400 litres en 200 secondes, tandis que, si c'était l'autre extrémité qui était adaptée à cet ajutage,

il fallait une charge d'un mètre d'eau pour obtenir un débit égal dans le même temps. Il y avait un petit étranglement résultant du mode de flexion de ce coude; vers le milieu, le tuyau n'avait qu'un diamètre intérieur de $0^m,028$, du moins dans le sens du rayon de courbure. Mais il est intéressant de remarquer qu'il donnait alors le même débit que le coude à angle droit brusque à longueur réduite, comme je l'ai indiqué ci-dessus, quand c'était la plus courte partie de ce dernier qui était adaptée à l'ajutage. Cela montre combien il est important de faire en sorte que les coudes soient suivis d'une certaine longueur d'ajutage, *même lorsqu'ils ne sont pas brusques* (1).

On a ensuite retranché complètement ce qui restait de la partie déjà raccourcie du coude à angle droit brusque, au-delà de l'arête précitée de la première partie. Les phénomènes sont devenus assez compliqués. Il est intéressant d'étudier ce qui se présente à cette limite pour diverses charges. Cela donnera une idée de la manière dont les effets sont modifiés, notamment à cause du mode d'action des mouvements obliques quand le coude se prolonge plus ou

(1) J'ai dit page 335 de la première partie que, pour un coude ayant un rayon d'arrondissement intérieur égal au diamètre du tuyau, trois lames courbes concentriques n'avaient pas sensiblement augmenté la hauteur obtenue par une colonne liquide oscillante. Je l'attribuais, du moins en partie, à ce que les autres causes de résistance étaient assez grandes par rapport à celle de ce coude arrondi. Il faut, d'après les expériences précédentes, ajouter une remarque essentielle. Dans l'ancienne expérience dont il s'agissait à cette page, le coude était disposé au bas du tuyau vertical dans lequel on observait les oscillations ascendantes. Or, il en résultait que le coude était nécessairement suivi d'une partie rectiligne qui se remplissait d'eau à mesure que la colonne liquide montait. On était donc, jusqu'à un certain point, dans le cas d'un coude arrondi partant d'un réservoir au lieu d'être à l'extrémité opposée d'un bout de tuyau. Sa résistance était donc moindre, d'après les dernières expériences, qu'on ne devait le penser; de sorte qu'il ne faudrait pas conclure de cette ancienne expérience que la résistance n'eût pas été notablement plus grande pour une autre position de ce coude.

moins au-delà de l'arête de la première partie, comme dans les expériences précédentes.

Lorsque la charge d'eau est assez grande (elle s'est élevée d'abord jusqu'à 1m,70), l'eau coule par toute la circonférence du tuyau qui semble couler plein. Mais quand cette charge est descendue jusqu'à 1m,315, il n'en est plus ainsi. Avant cette époque la veine liquide était déjà composée de deux parties de couleurs différentes, c'est-à-dire que celle d'aval était limpide et celle d'amont beaucoup plus blanche. A une distance de 0m,07 de l'orifice, le diamètre parallèle à l'axe du tuyau conservé était de 0m,09. Pour une charge d'eau de 1m,50, ce diamètre n'était plus que de 0m,08.

On a pensé que la couleur blanche provenait de ce que l'air était enveloppé dans cette partie de la veine. Cela s'accorde avec ce qui se passe quand la charge n'est plus que de 1m,315. A cette limite commence une ouverture dans la partie qui est du côté du réservoir. Cette ouverture apparaît vers la hauteur de l'axe du tuyau coupé, et va toujours en augmentant à mesure que la charge diminue pendant que le réservoir se vide. La veine liquide n'est plus qu'une couche d'eau dont l'épaisseur variable diminue quand la charge devient de plus en plus faible. De sorte que le réservoir se vidant graduellement à la fin de l'expérience, la section de la veine est un véritable *croissant*, dont la partie ouverte est du côté du réservoir, et l'on peut même y introduire le doigt sans qu'il soit mouillé.

Pour la charge de 1m,70, l'angle du filet, limite extérieure de la partie d'aval du jet avec l'axe du tuyau conservé, est assez aigu. A mesure que le réservoir se vide, il tend à se rapprocher d'un angle droit, ce qui n'arrive cependant pas tout à fait. L'angle que fait avec le même axe le filet limite de la partie d'amont, je veux dire de celle qui est du côté du réservoir, est moins aigu que le premier et, à la fin de l'expérience de vidange du réservoir, il devient légèrement obtus.

A mesure que la charge diminue, le diamètre horizontal

de la veine est moindre dans les limites suivantes. Pour une charge de 1^m,40 à la distance précitée de l'orifice, il n'est plus que de 0^m,075; pour une charge de 1^m,20, il n'est plus que de 0^m,07 ; pour une charge d'un mètre, il est de 0,065 ; enfin, pour une charge de 0^m,9, il est de 0^m,055. On n'a pas noté les diamètres apparents pour les charges moindres.

Quand la partie du coude à angle droit brusque qui était en aval avait une longueur de 0^m,015, à partir de l'arête du tuyau, on voyait aussi très bien la différence des couleurs des deux parties de la veine. La partie blanche occupait au moins la moitié de la bouche du tuyau ; cette partie était très éparpillée et jetait l'eau beaucoup moins loin.

Dans ce cas, la caisse de jaugeage était remplie en 238 secondes sous une charge d'un mètre. Avec la même charge, lorsque la partie d'aval du coude était entièrement coupée au-delà de l'arête de la première, comme je viens de le dire, il ne fallait que 226 secondes. Quand la seconde partie du coude avait une longueur de 0^m,03 au-delà de cette arête, on voyait encore des différences de couleur dans les deux portions de la veine.

On a fait aussi des observations sur le débit pour divers coudes, les charges étant très différentes des limites précédentes. Mais il paraît qu'on doit plutôt compter sur l'exactitude des observations faites avec des charges assez grandes, parce que, pour s'assurer que le niveau était assez sensiblement constant, on était obligé de régler avec soin un robinet d'alimentation. On conçoit d'ailleurs que, pour les très petites charges, un tube de verre, disposé à une certaine distance de l'orifice, ne donnait pas des indications assez certaines des véritables hauteurs de l'eau au-dessus de cet orifice. Aussi je n'ai pas osé me servir des résultats obtenus avec de très petites charges et même je ne donne les suivants que pour valoir ce que de raison. Avec une charge de 1^m,70, la partie d'aval étant supprimée, comme je viens de l'expliquer, il ne fallait que 185 secondes pour remplir la

caisse de jaugeage, tandis qu'il en fallait 200 lorsque la partie précitée de 0m,15 de long était conservée et disposée en aval. Lorsque les charges étaient successivement de 0m,50, 0m,40, 0m,30, les durées de chaque remplissage sous une charge constante étaient successivement de 343 secondes, 384 secondes, 450 secondes lorsque cette partie n'était pas conservée, tandis qu'elles étaient successivement de 365 secondes, 408 secondes, 470 secondes, quand cette partie était conservée en aval. Cela dépendait sans doute de ce que dans le premier cas les mouvements obliques étaient moins gênés, la partie d'aval dans le second n'étant pas d'ailleurs remplie. Sans attacher trop d'importance à ces derniers chiffres, à cause des raisons que j'ai données ci-dessus, il peut être intéressant de les indiquer sans entrer d'ailleurs dans le détail de toutes les observations de ce genre, afin de donner une idée de la marche des phénomènes quand la partie d'aval du coude n'est pas assez longue pour être utilisée comme ajutage.

On a essayé d'autres coudes à angle droit brusque. Pour l'un d'eux la partie du coude d'amont ayant 0m,15 de long, celle d'aval avait 0m,06 de long au-delà de l'arête du tuyau. Avec une charge d'un mètre, il a donné un débit un peu moindre que le coude à angle droit brusque dont chaque partie avait 0m,15 de long, l'écoulement a duré 206 secondes au lieu de 200. Mais quand on a disposé la partie la plus courte sur l'ajutage, la durée de l'écoulement a été réduite au contraire à 195 secondes. Si ce coude a donné un débit un peu plus grand que celui dont les deux branches avaient chacune 0m,15 de long, cela dépend sans doute de ce qu'il y avait moins de frottement, sans que cela empêchât l'effet d'ajutage en aval. En effet, quand la longueur d'une des branches a été portée à 0m,30, l'autre ayant 0m,15 de long, la durée de l'écoulement a été de 210 secondes.

Il paraît résulter de ces expériences qu'il suffit que la partie du coude qui est en aval ait, au-delà de l'arête de l'autre

partie, une longueur double du diamètre du tuyau pour que l'effet, analogue à celui d'un ajutage cylindrique qui en résulte, soit produit, quant à la partie la plus essentielle, pour un coude à angle droit brusque. On conçoit au reste que, dans certaines limites difficiles à bien préciser pour les divers cas, une plus grande longueur de cette espèce d'ajutage peut avoir un certain avantage compensé par l'augmentation du frottement résultant de cette longueur quand le mouvement est permanent ou suffisamment continu. J'ai expliqué plus haut comment les choses peuvent être modifiées quant aux effets de cette longueur dans le mouvement oscillatoire.

Pour un autre coude à angle droit brusque, la partie conservée en aval au-delà de l'arête de la première était de $0^m,03$, égale au diamètre du tuyau. Avec une charge de $1^m,70$, la caisse de jaugeage, contenant toujours 400 litres, a été remplie en 191 secondes, tandis qu'il en fallait 200 quand la partie conservée au-delà de la même arête était d'une longueur moitié moindre. Mais pour des charges successives de $0^m,50$, $0^m,40$, $0^m,30$, $0^m,20$, les débits étaient au contraire plus grands pour ce dernier coude que pour l'autre. Ainsi, le nombre de secondes pendant lequel s'est fait le même remplissage a été successivement de 372, 413, 478, 583 au lieu de 365, 408, 470, 574.

Je n'attache, comme je l'ai dit, qu'une importance très secondaire aux chiffres obtenus avec de petites charges à cause des chances d'erreur que j'ai signalées. J'en conserve seulement quelques-uns parce qu'ils peuvent mettre sur la voie de l'explication de certains phénomènes du mouvement de l'eau dans les coudes.

Voici encore une série d'expériences toutes faites sous une charge d'un mètre. La caisse de jaugeage, toujours la même, a été remplie successivement dans le nombre de secondes suivant : 200, 204, 206, 207, 215, 236, 238, 232, 226, les longueurs de la partie d'aval du coude au-delà de l'arête de la partie entièrement conservée étant seccessivement de $0^m,135$, $0^m,0975$,

$0^m,060$, $0^m,045$, $0^m,0375$, $0^m,030$, $0^m,015$, $0^m,005$, $0^m,000$.

Les phénomènes sont assez compliqués et leur marche dépend pour une partie de ces coudes de la grandeur des charges dans un sens qu'il n'est pas facile d'expliquer d'une manière rigoureuse. Quand elles dépassent certaines limites, l'aspect de la veine à sa sortie est le même que si le tuyau coulait plein. La couleur d'une partie de cette veine indique cependant un mélange d'air. Mais on conçoit que l'effet d'ajutage peut alors commencer à se produire. Or, s'il n'en est plus ainsi pour les charges beaucoup moindres, l'influence de la réaction des parois sur les filets dont l'obliquité n'est pas la même, peut changer l'état de la question d'une manière difficile à prévoir *à priori*, jusqu'à ce que l'on ait donné à la partie d'aval du coude assez de longueur pour qu'on puisse plus sérieusement compter sur un véritable ajutage cylindrique.

Mais les points essentiels dont la recherche m'intéressait pour le choix des dispositions générales du grand tuyau de conduite de mes systèmes d'écluses de navigation à colonnes liquides oscillantes sont suffisamment éclaircis. Il est beaucoup plus important qu'on n'aurait pu le croire au premier aperçu, de disposer un coude à angle droit brusque qui ne peut être évité dans une des formes de ces systèmes, du côté où il est toujours suivi d'un tuyau d'une certaine longueur et où les oscillations sont moins importantes en général. Je renvoie d'ailleurs à ce que j'ai dit ci-dessus relativement à ces diverses considérations, ce chapitre ayant seulement pour but de confirmer par des détails d'expériences les principes que j'ai exposés sur la manière de déterminer les formes des extrémités du grand tuyau de conduite.

On peut demander dans quelles limites les lames concentriques diminuent la résistance de l'eau dans un coude plus ou moins arrondi. Quand le mouvement est permanent, les choses se passent sans doute, du moins jusqu'à un certain point, à peu près de la même manière que si l'espace com-

pris entre deux lames courbes concentriques voisines l'une de l'autre formait un tuyau coudé séparé.

Il est clair que plus il est près de la partie concave du coude, plus le rapport du rayon moyen de courbure à la largeur de ce tuyau est grand, cette largeur étant, bien entendu, considérée comme perpendiculaire à la tangente de l'axe du tuyau coudé. On a ainsi une première idée de la résistance dans chacun des tuyaux partiels formés par des lames concentriques, si l'on connaît la résistance dans des coudes de courbures analogues, et l'on prévoit à peu près dans quelles limites on pourra augmenter le nombre de ces lames, sans que la quantité dont elles diminuent la résistance soit compensée par l'augmentation du frottement résultant de leurs surfaces. Mais il est bien entendu qu'il ne s'agit pas d'une appréciation rigoureuse, surtout à cause des effets de *contraction* pouvant provenir de l'obliquité des filets liquides résultant des modes d'écoulement par les divers passages concentriques.

On pourrait faire des remarques analogues pour le mouvement de l'eau dans un canal découvert si, comme objet de curiosité, on y disposait des surfaces courbes concentriques verticales. Cependant les phénomènes ne sont plus tout-à-fait de la même nature, à divers égards, dans une rivière ou dans un long canal que dans les tuyaux courts sur lesquels j'ai fait à ce sujet les expériences précitées. Si en aval du coude il y a nécessairement une grande longueur de tuyau ou de canal, on n'a plus à s'embarrasser des considérations sur les diverses longueurs de la partie d'aval, qui ont été l'objet des dernières expériences faites à Cherbourg.

Quant aux oscillations dans les tuyaux, il y a à considérer deux cas bien distincts, celui pour lequel, comme dans différentes circonstances où j'ai fait des observations sur l'effet des lames courbes, la masse d'eau comprise entre ces lames est peu de chose par rapport au reste de la colonne liquide en mouvement et celui où il n'en est pas ainsi.

Considérons un siphon renversé à branches verticales très larges réunies inférieurement par un coude ayant une partie horizontale très courte. Il est intéressant d'étudier la manière dont la force vive se distribuera pendant les oscillations de l'eau d'une branche verticale à l'autre. Je suppose que, par un moyen quelconque, on ait mis la colonne liquide en oscillation et que, par cette raison, une des branches verticales soit vidée, l'autre étant remplie jusqu'au sommet. Le liquide, dans un instant très court, serait par hypothèse en repos au moment où l'ascension commencerait dans l'autre branche. Dans le cas où, par exemple, la hauteur verticale de chaque branche serait égale à sa largeur, si, pour simplifier les considérations, on suppose la section quadrangulaire, on pourra, au moyen de lames concentriques, diviser le coude en un certain nombre de parties concentriques régulières, la section totale étant par hypothèse assez grande.

L'utilité des lames courbes concentriques dépend de ce que la veine liquide tend en général à s'écraser dans la partie d'aval d'un coude, en y prenant des vitesses beaucoup plus grandes que dans l'autre partie. Mais pour le cas dont je viens de parler, la colonne liquide partant du repos, il faut avoir égard à la manière dont résiste l'inertie de ce qu'on pourrait appeler les *couches liquides* concentriques, en supposant même qu'on n'employât aucune des lames solides dont il s'agit. On conçoit que les couches ou lames liquides qui ont les plus grandes longueurs développées, ayant plus de masse que les autres, leur inertie pourra s'opposer plus à la production de la vitesse (1).

(1) On peut remarquer qu'il se présente dans le mouvement des ondes liquides des effets d'inertie plus ou moins analogues à ceux dont il s'agit pour ces oscillations dans des conditions exceptionnelles. Ainsi, il résulte de l'inertie que le mouvement ondulatoire de l'eau diminue, toutes choses égales d'ailleurs, quand la profondeur du liquide augmente. On conçoit peut-être encore mieux, d'après les phénomènes des ondes, exposés dans la première partie, de quelle ma-

Les vitesses pourraient donc se distribuer d'une manière très différente pour ce cas de ce qui se présenterait dans un mouvement permanent, et des lames concentriques solides n'agiraient plus dans les mêmes conditions. Il est d'ailleurs difficile de déterminer *à priori* d'une manière rigoureuse quel serait leur effet pour diverses circonstances, si la branche horizontale du siphon renversé n'avait pas une certaine longueur. Les vitesses ascendantes de l'eau pourraient, en effet, être, surtout au commencement de l'oscillation, bien plus grandes dans la partie d'amont de la branche où l'eau monte que dans sa partie d'aval. C'est précisément le contraire de ce qui a lieu pour le mouvement permanent dans un tuyau de forme semblable. On conçoit que les filets de la partie d'amont tendront ensuite à écraser plus ou moins les autres. De sorte qu'il est difficile de bien prévoir comment se fera la distribution des mouvements pour le genre particulier d'oscillations dont il s'agit, mais qui ne se présente pas dans les limites de mes expériences sur les lames courbes concentriques.

Pour les cas analogues à ceux dans lesquels j'ai fait des expériences sur les lames courbes, il faut cependant en principe tenir compte au premier instant des effets de l'inertie dont je viens de parler. Ainsi, dans ce premier instant les lames courbes ne peuvent pas avoir autant d'avantage pour diminuer la résistance d'un coude que si le mouvement était permanent. Il faut même avoir égard à ce genre de considérations tant que la vitesse augmente. Mais on conçoit que bientôt, si elles ne sont pas aussi efficaces que dans le mouvement permanent, les lames courbes diminuent la résistance de l'eau en mouvement, ainsi que l'établissent mes expériences précitées.

nière le mouvement doit se propager dans les couches les plus profondes et dans celles qui sont le plus près de la partie concave du coude, objet de cette note.

Il n'est pas sans quelque intérêt, même pour étudier le mouvement de la colonne liquide en oscillation abandonnée à elle-même, de considérer la manière dont les vitesses se distribuent entre des lames courbes concentriques, dans l'hypothèse précitée où l'amplitude de l'oscillation ne serait pas grande par rapport au diamètre du siphon renversé, la branche horizontale étant très courte. Il y aura plus de vitesse, d'après ce que j'ai déjà dit, dans les siphons partiels ayant moins de longueur développée que dans les autres, à cause des effets de l'inertie. Il en résultera donc une perte de force vive, analogue à celle qui se présente quand l'eau entre d'un tuyau de conduite dans une section beaucoup plus grande que celle de ce dernier. Il y aura d'ailleurs au-delà des surfaces courbes, dans la branche verticale où l'eau entrera avec des vitesses différentes par les divers siphons partiels, des mouvements obliques résultant de ces variations de vitesses. Il y aura aussi, par des raisons semblables, des mouvements obliques dans l'autre branche verticale où l'eau descendra.

Il est donc bien entendu que les lames courbes concentriques sont proposées seulement pour les cas analogues à ceux que j'ai étudiés par expérience, et dont les principes trouvent d'ailleurs immédiatement leur application dans plusieurs de mes appareils hydrauliques. Quant aux conditions exceptionnelles que je viens de considérer, ces lames pourraient être plus nuisibles qu'utiles en ce qu'elles empêcheraient les vitesses de se propager aussi convenablement dans la partie concave du coude. Mais, d'après les principes que je viens d'exposer, on voit comment les recherches devraient être dirigées, pour les diverses circonstances qui peuvent se présenter, dans les mouvements oscillatoires ou variables, selon le rapport de la longueur de la branche horizontale d'un siphon à son diamètre.

Il y a sans doute des conditions pour lesquelles les lames courbes concentriques n'auraient qu'une influence insigni-

flante sur les vitesses des couches liquides, et seraient nuisibles par leur frottement. En effet, si la longueur de la partie horizontale est très courte, les vitesses les plus grandes dans la branche où l'eau monte seront à la partie d'amont, comme je viens de l'expliquer. Elles seront au contraire dans la partie d'aval, si la branche horizontale est assez longue. Il paraît donc que, pour une certaine longueur intermédiaire, une libre déviation remplira, sans l'emploi des lames dont il s'agit, les conditions nécessaires pour que les vitesses des diverses couches se distribuent d'une manière convenable. Il y aura d'ailleurs une certaine tendance à ce que celles de la partie d'amont écrasent, comme je l'ai indiqué, celles de la partie d'aval.

Les diamètres des tuyaux employés à Cherbourg, dans les expériences sur les coudes, ne sont pas assez grands pour qu'on puisse en conclure quels seraient les véritables coefficients des résistances, si les sections étaient aussi grandes qu'à l'écluse de l'Aubois. Aussi, mon but a été surtout de chercher les conditions les meilleures pour choisir la position de chaque espèce de coude, surtout lorsqu'on ne peut se dispenser d'en employer un à angle droit brusque. Je ferai d'ailleurs observer que S'Gravesande, du Buat et Venturi ont opéré aussi sur des tuyaux coudés de petits diamètres. Quand il s'agit de grandes vitesses comme celles des principales expériences précitées faites à Cherbourg, il y a des raisons de penser que la nature des flexions des filets liquides peut ne pas différer beaucoup de celles qui se présenteraient pour de grands diamètres.

Cependant il paraît que dans certains cas, pour de grands diamètres, les coefficients de la résistance dépassent ceux qui auraient été calculés au moyen des expériences de du Buat. Il est donc bien entendu que mon but est principalement de montrer, par la marche des résultats, l'utilité de choisir convenablement la place de chacun des coudes. Si, pour les grandes sections, les coefficients de la résistance sont plus

notables que pour les petites, c'est une raison de plus pour avoir égard aux considérations sur lesquelles repose la disposition générale qui en résulte, et qui est représentée sur la planche VI.

Moyen d'obtenir une marche entièrement automatique par un jeu de cataractes.

Ainsi que je l'ai expliqué ci-dessus, les expériences faites à l'écluse de l'Aubois sur la marche automatique du tube d'aval pendant le remplissage du sas, sont plus intéressantes que réellement utiles. J'ai annoncé que je reviendrais sur ce sujet, en remarquant d'ailleurs que, si l'on ne craignait pas d'employer un ou plusieurs clapets, du genre de ceux du bélier aspirateur, on pourrait, pendant cette partie de la manœuvre, ne pas faire fonctionner le tube d'amont, ces clapets ou soupapes étant, comme on sait, automatiques dans toutes les conditions analogues.

Il faut avant tout ne pas perdre de vue la nécessité de faire lever ce tube de lui-même au moyen de son contrepoids, afin d'éviter l'introduction de l'air, pendant ce remplissage, dans le grand tuyau de conduite. Si donc on fait retomber ce tube en temps utile, en employant pour cela un second contrepoids disposé à l'autre extrémité du balancier, c'est-à-dire du côté de l'axe où se trouve le tube, il faudra que ce second contrepoids cesse d'agir à l'époque où l'autre devra retomber. Or, cela est facile au moyen d'un vase alternativement rempli et qui se videra de lui-même quand il sera arrivé au bas de sa course.

On sait qu'il y a plusieurs manières de remplir et de vider le vase d'un balancier hydraulique ordinaire. Ainsi une soupape à tige inférieure peut se soulever lorsque le vase est

convenablement descendu. A cause de l'inertie de la longue colonne liquide contenue dans le grand tuyau de conduite, il faut un certain temps pour que l'oscillation en retour de l'eau qui est entrée dans le sas monte dans les tubes verticaux assez pour empêcher le tube d'aval de se relever avant l'instant où cela est utile. Mais on peut obvier à cet inconvénient en réglant la soupape d'évacuation du vase mobile de manière qu'il ne se vide pas trop tôt.

Il n'est nécessaire de le vider que pour l'époque où dans le tube d'aval le niveau sera convenablement baissé, après la descente du tube d'amont. Ainsi on a pour vider le vase mobile toute la durée de l'oscillation en retour de bas en haut, plus toute la durée de l'écoulement de l'eau vers l'écluse, non seulement pendant que le tube d'amont est levé, mais pendant qu'il est baissé et que l'eau descend encore dans les deux tubes verticaux jusqu'à la profondeur nécessaire pour que le tube d'aval se lève de lui-même sans permettre à l'air de s'introduire dans le tuyau de conduite.

Les durées des périodes étant variables, il faut pouvoir empêcher l'eau de se perdre, quand le vase précité du balancier hydraulique se sera rempli en ouvrant lui-même une soupape ou un robinet, en vertu de son ascension, par des moyens dont on peut voir les dessins dans le *Traité de mécanique* de Christian. On sait qu'il suffit pour arrêter ainsi l'écoulement dans divers régulateurs de ce genre de faire soulever une soupape par un flotteur. Ce dernier peut être suspendu à la tubulure d'introduction de l'eau dans ce vase, qui, en se remplissant, la fermera tout naturellement.

Il est inutile d'entrer ici dans des détails de ce genre pour lesquels je renvoie aux traités de mécanique. Il faut accrocher et décrocher en temps convenable l'extrémité du balancier, afin que le tube reste levé tant que cela est nécessaire et retombe à l'instant voulu. Il est bien à remarquer qu'il ne doit pas retomber trop tôt, parce que cela introduirait de l'air dans le tuyau de conduite. S'il retombait trop tard, il

n'en résulterait aucun inconvénient de ce genre, mais cela pourrait être une cause de diminution d'effet dans certaines limites ; cependant il pourrait y avoir de l'utilité, parce que l'écoulement de l'eau qui reviendrait du sas engendrerait de la force vive qui augmenterait la hauteur de l'oscillation remontante dont j'ai expliqué les avantages.

Le moyen le plus sûr de faire décrocher, en temps utile, l'extrémité du bras le plus long du balancier paraît être le suivant. On peut disposer un flotteur dans un puits ou tuyau vertical fixe, en communication avec l'écluse par un tuyau de conduite, débouchant vers le milieu de la longueur du sas, afin qu'il y ait moins d'irrégularité dans les mouvements de l'eau au-dessus du point où il y débouchera.

Ce flotteur portera une tige verticale, ayant des dents disposées à des hauteurs diverses, déterminées de manière que chacune d'elles puisse agir sur un déclic à la fin de l'époque où l'eau achèvera de monter dans l'écluse à chaque période de la machine de remplissage. Ce moyen ne signalera pas d'une manière tout à fait rigoureuse les instants précis où le tube d'aval devra retomber. Mais, comme je l'ai expliqué, il n'y aura pas d'inconvénient, et il pourra même y avoir quelque avantage à ce que sa descente soit un peu retardée. Or, c'est précisément ce qui arrivera en vertu de l'inertie de l'eau dans le tuyau de communication entre le sas et la capacité dans laquelle fonctionnera le flotteur.

J'aurai occasion pour une autre machine de revenir sur l'emploi des déclics. Mais comme ils sont très connus, il ne paraît pas nécessaire d'entrer ici dans les détails sur la manière de les faire fonctionner, sans qu'ils soient gênants pendant la vidange de l'écluse. Il suffit de rappeler que les balanciers n'ont plus de *coup de fouet*, à cause des *freins hydrauliques*, et que la hauteur à laquelle le tube d'aval doit rester soulevé pendant cette époque du remplissage, pouvant varier un peu sans inconvénient bien sensible, on a toutes les facilités désirables pour ce genre de manœuvre, le balancier

pouvant au besoin dépasser le déclic et venir s'appuyer ensuite contre lui.

Lorsque l'appareil ne marchera pas, le vase précité pourra, si l'on veut, servir de compresseur, afin d'assurer au besoin l'adhérence du tube d'aval sur son siège. Il suffira pour cela de le disposer de manière à le remplir sans lui permettre de se vider, et de le laisser agir à l'extrémité du bras du balancier auquel il sera attaché.

Il y a une autre disposition dont il est intéressant de conserver la trace quand même elle ne serait pas aussi pratique. Je suppose que pendant le remplissage de l'écluse on attache, au moyen d'un embrayage, un bras de levier à l'essieu du balancier. Cette pièce portant un poids à son extrémité serait disposée de manière qu'en vertu de la position du balancier ce poids eût son maximum de bras de levier quand le tube d'aval serait levé, de sorte qu'il ne s'agirait pour faire redescendre celui-ci que de lâcher un déclic au moment voulu. Lorsque le tube serait baissé, il résulterait de la position du balancier que le bras du levier pourrait être annulé.

Quand le tube devrait se relever, ce poids ne ferait d'abord éprouver qu'une résistance très petite, mais qui augmenterait à mesure que le tube serait soulevé. Dans l'état actuel des choses, on est obligé de perdre une certaine quantité de travail pour vaincre l'inertie du tube et pour amortir sa percussion sur son siège lorsqu'il redescend. Or, au moyen de cette combinaison, les vitesses acquises du tube, de son balancier, en un mot, de tout le système solide en mouvement pourraient être utilisées. Le poids dont je viens de parler serait soulevé plus haut que ne le permettrait un état d'équilibre stable. Lorsque le tube descendrait, il soulèverait le contrepoids ordinaire plus haut aussi que ne le permettrait un état d'équilibre stable. On conçoit donc que la force vive de tout ce système solide serait utilisée d'une manière rationnelle. Mais, avant d'avoir fait l'expérience, on ne serait pas

aussi sûr de l'achèvement complet des courses et du jeu, qu'en employant le vase précité du balancier hydraulique.

Dans l'un et l'autre système on pourrait employer les mêmes moyens pour faire lâcher le déclic en temps utile. Il ne paraît pas tout à fait indispensable de se servir pour cela du flotteur garni de dents. On laisserait revenir un peu d'eau de l'écluse et cela suffirait probablement pour agir d'une manière convenable sur le déclic, au moyen d'une palette recevant la percussion de cette eau, à l'extrémité inférieure d'un très long bras de levier vertical, analogue à celui qui, à l'écluse de l'Aubois, fait fonctionner la sonnette automatique dans de moins bonnes conditions. Il faut, en effet, tenir compte de ce que, pour la disposition générale représentée sur la planche VI, la vitesse de l'eau, qui reviendrait ainsi de l'écluse, serait plus grande dans la partie d'aval du coude que dans la partie d'amont. On serait donc dans de bonnes conditions pour recevoir la percussion sur la palette verticale dont il s'agit et qui serait disposée immédiatement en aval, de sorte qu'il ne paraît pas nécessaire de faire revenir pour cela de l'écluse plus d'eau que cela n'est d'ailleurs utile pour produire dans de bonnes conditions des oscillations remontantes.

Il n'y a aucune difficulté à faire fonctionner de lui-même le tube d'amont pendant le remplissage de l'écluse, dès que l'eau est à une certaine hauteur dans le sas. Mais dans le cas, probablement le plus général, où l'on ne se servirait pas d'un bassin d'épargne pour produire une grande oscillation initiale de remplissage, les premières périodes de ce tube ne pourraient pas être automatiques d'une manière avantageuse, si l'on se contentait d'employer les moyens indiqués ci-dessus. Les oscillations en retour ne monteraient pas assez pour que ce tube fût soulevé par le contrepoids de son balancier.

Si l'on tient à ce que ces premières périodes soient automatiques, il suffit d'augmenter le contrepoids dont il s'agit, au moyen d'un vase alternativement rempli d'eau, qui se videra au bas de sa course comme celui d'un balancier hydrau-

lique ordinaire; j'ai indiqué ci-dessus comment on évitera de perdre de l'eau quand le vase sera rempli.

Pendant la vidange de l'écluse, les premières périodes ne peuvent pas non plus être automatiques, d'une manière avantageuse, si l'on se contente d'employer les moyens indiqués ci-dessus, parce que les oscillations en retour ne descendent point assez bas pour que le tube d'aval se lève de lui-même. Mais il suffit d'augmenter aussi le contrepoids de son balancier, par un vase alternativement rempli et vidé, comme je l'ai expliqué pour l'autre tube.

L'emploi de chacun des deux derniers vases dont je viens de parler pourrait avoir un inconvénient, en ce que le tube qu'il ferait fonctionner se lèverait aussitôt pour les premières périodes que pour les dernières. De sorte qu'on ne jouirait presque plus de l'économie résultant des oscillations en retour. Or, il sera toujours facile d'obvier à cet inconvénient, en réglant le robinet ou la soupape d'introduction de l'eau motrice pour chacun de ces vases.

Il suffira pour cela, si l'on se défie de l'attention de l'éclusier, de disposer un flotteur dans un tuyau recourbé verticalement et débouchant par son autre extrémité dans l'écluse, comme je l'ai expliqué ci-dessus. Ce flotteur règlera convenablement l'introduction de l'eau dans chacun des vases précités, et qui, dans les dernières périodes, n'aura plus besoin d'augmenter ainsi son poids.

Le nombre de périodes de l'appareil pouvant être réduit beaucoup plus qu'on ne l'espérait, les considérations précédentes, sur l'emploi des vases de balanciers hydrauliques, appelés aussi *cataractes*, ne paraissent avoir qu'une importance secondaire. Mais quel que puisse être leur degré d'utilité, il n'est pas sans intérêt d'en conserver la trace, en montrant comment leurs effets peuvent se combiner avec ceux des oscillations. Ces détails feront d'ailleurs peut-être mieux comprendre la marche générale des mouvements tels qu'ils sont coordonnés dans le jeu de l'appareil.

Moyen de varier la forme des tubes mobiles et de diminuer la profondeur des fondations en supprimant les coudes.

Les grands tubes mobiles analogues à ceux qui sont construits à l'écluse de l'Aubois, paraissant très pratiques depuis que les nouveaux freins hydrauliques y sont appliqués, j'ai cru devoir donner des détails sur les coudes du genre de ceux qu'on ne peut éviter quand on les emploie. M. Vallès dit dans son dernier rapport :

« . . . . . Ces deux tubes considérés à ce simple point de vue de la « vidange et du remplissage immédiat du sas, sont bien préférables « au système des ventelles adoptées pour cet objet; car ils opèrent « plus vite, ils provoquent moins d'agitation dans le sas, et dimi- « nuent dans une notable proportion les pertes d'eau et l'usure des « portes . . . »

Il dit plus loin, après avoir donné la description des nouveaux freins hydrauliques : « . . . En résumé, aujourd'hui le coup de fouet « des longs balanciers de l'appareil est entièrement supprimé ; les « percussions des tubes sur leurs sièges sont insignifiantes, on « pourrait même si l'on voulait, mais cela ne me paraît nullement « nécessaire, les diminuer encore parce que la pièce de bois inté- « rieure du frein se trouve avoir aujourd'hui plus de temps qu'il « ne lui en faut pour retomber d'elle-même dans la position d'où « elle doit être relevée, de sorte qu'on pourrait donner une petite « augmentation à son diamètre.

« Ce qui distingue très spécialement le frein hydraulique que « nous venons de décrire de ceux connus jusqu'à ce jour, c'est la « suppression, très précieuse au point de vue des commodités de la « pratique, de toute espèce de clapets, de soupapes et organismes « intérieurs plus ou moins compliqués. . . »

Les recherches précitées sur les coudes à angle droit brusque ne seraient pas indispensables, si l'on disposait le système comme je l'avais présenté dans une note de 1844 reproduite

ci-dessus. Il n'y aurait, en effet, qu'un seul coude arrondi sous un seul tube composé de deux parties mobiles. La soupape annulaire à double siège, dite de Cornwall, pouvant avoir quelques inconvénients si l'on ne prenait pas assez de précautions pour éviter l'engorgement provenant des herbes, il n'est peut-être pas sans quelque intérêt de signaler un autre genre de soupape annulaire.

L'anneau inférieur, qui doit alternativement se poser sur un siège fixe, pourrait, au moyen d'un manchon en cuir, être réuni à la partie supérieure servant de siège à une des extrémités de la soupape de Cornwall. De cette manière l'eau ne pourrait passer que sous l'anneau inférieur et l'on supprimerait toute chance d'engorgement à la partie supérieure de ce *tuyau-soupape*. Le cuir formant un manchon ou tuyau flexible serait, bien entendu, garni de plusieurs anneaux métalliques parallèles, disposés d'une manière analogue à ce qui est employé pour les soufflets cylindriques et l'a été pour d'anciennes pompes à piston formé d'un manchon de cuir.

Cette forme de soupape annulaire ayant attiré l'attention d'hommes expérimentés auxquels je l'ai communiquée, j'ai cru devoir en dire quelques mots. S'il vaut mieux en général employer des pistons d'une autre forme, il peut être utile de signaler celle-ci pour ce genre de construction exceptionnelle. Je ne le fais au reste qu'avec une extrême réserve, une expérience en grand pouvant seule montrer s'il n'en résultera pas trop de résistance. J'ignore d'ailleurs si l'on ne trouvera pas plus convenable de substituer au cuir d'autres enveloppes flexibles, et j'indique seulement ce sujet d'étude (1) :

(1) On simplifierait tellement la disposition générale si l'on pouvait employer des soupapes annulaires, qu'il me paraît intéressant d'appeler l'attention des ingénieurs sur diverses études à faire dans cette direction. Ainsi, au lieu de se servir du manchon dont je viens de parler, dans le cas où il éprouverait trop de résistance à la flexion, on pourrait essayer une vanne cylindrique d'un diamètre un peu moindre qu'un bout de tuyau dans lequel glisserait sa partie supérieure qui serait garnie d'un caoutchouc. Il s'agirait de faire en sorte que ce dernier ne

Mais sans entrer dans des détails de ce genre, si l'on reconnaît la possibilité de n'avoir qu'un seul tube vertical dont la partie inférieure soit composée d'une vanne cylindrique ou soupape annulaire quelconque, il est intéressant de montrer comment peuvent être variées les applications des principes de la marche au moins en partie automatique. Considérant, par exemple, une soupape de Cornwall, on peut ne pas la faire soulever par un contre-poids, quand la colonne liquide est descendue assez bas dans le tube vertical. On pourrait, en effet, la disposer de manière à la laisser retomber par son propre poids, lorsque le liquide ne la soutiendrait plus assez en pressant par dessous son anneau supérieur. Dans le mouvement de retour de l'eau de bas en haut, il se produirait un phénomène de succion, d'une nature très différente de celui en vertu duquel le tube d'aval redescend au sas de l'Aubois quand il se vide. Je ne fais d'ailleurs qu'indiquer très succinctement ici cette disposition secondaire à cause de son extrême simplicité et d'un effet intéressant de succion. J'aurai occa-

fût pas trop pressé de dedans en dehors quand on lèverait la soupape cylindrique, afin qu'on n'eût pas beaucoup plus de peine à la lever qu'une soupape de Cornwall. Lorsqu'elle serait baissée, la pression de l'eau s'appuyant sur ce caoutchouc tendrait tout naturellement à rendre le sommet de la soupape aussi étanche que s'il y avait un double siège.

Le moyen suivant m'a été proposé : on soulèverait la soupape en employant pour cela une série de tringles articulées dont la disposition serait analogue à celle des baleines d'un parapluie. Chacune de ces tringles serait attachée par une extrémité à une plaque de métal adaptée au bourrelet en caoutchouc, l'autre extrémité étant attachée à une *glissière* mobile sur une tige centrale fixe. Chacune de ces extrémités serait tout simplement articulée au moyen d'un anneau. Quand on lèverait cette armature, les tringles tendraient à diminuer l'adhérence du caoutchouc résultant de la pression de l'eau intérieure. Il est facile de voir comment cette disposition pourrait être modifiée, si l'on voulait l'appliquer au tube d'amont dont la partie supérieure serait fixe. Mais il me paraît plus simple, en général, de faire celui-ci d'une seule pièce, surtout depuis la réussite des nouveaux freins hydrauliques à l'écluse de l'Aubois.

sion de revenir sur ce sujet en étudiant un autre de mes appareils, dont la soupape de Cornwall se relève ainsi de bas en haut par l'effet du même phénomène.

Les soupapes annulaires ou vannes cylindriques pourraient avoir une autre disposition dont le principe aurait, quant au jeu du système, de l'analogie avec ce qui s'est présenté quand les deux tubes mobiles de l'écluse de l'Aubois ont été conduits l'un par l'autre. On supprimerait entièrement les deux tubes verticaux mobiles, ainsi que leurs coudes. Les deux vannes ou soupapes cylindriques pourraient être invariablement attachées l'une à l'autre, leur axe commun étant horizontal comme celui du tuyau de conduite. Quand l'une serait ouverte, l'autre serait fermée. Le tuyau horizontal se terminerait par une pièce conique disposée à son intérieur, afin de diminuer la déviation des filets liquides. Un tube vertical fixe, qu'on peut appeler *tube de sûreté*, serait mis près de cette extrémité entre les deux soupapes pour atténuer au besoin toute chance de coup de bélier, comme je l'ai expliqué pour une autre forme de l'appareil.

Cette disposition générale permettrait de réduire la profondeur des fondations. Le liquide, quand il rentrerait au bief d'amont, en vertu de la vitesse acquise, aurait devant lui de l'espace pour se répandre de divers côtés, en *rayonnant*, si l'on peut s'exprimer ainsi. De sorte qu'il n'en résulterait sans doute aucun coup de bélier bien sensible, quand même on n'aurait pas le tube de sûreté.

A l'occasion de la disposition précédente, et de celles qui sont aussi relatives surtout aux cas où le niveau du bief d'amont serait très variable, je vais compléter par des considérations théoriques ce que j'ai dit plus haut sur d'autres formes de l'appareil, et il en résultera même de nouvelles raisons en faveur de celle qui est représentée sur la planche VI.

Quand une colonne liquide en mouvement est mise en communication avec de l'eau en repos, il faut, pour qu'elle continue

à se mouvoir, qu'elle communique à celle-ci de la force vive. Or, elle aura d'autant moins à en engendrer que la section du liquide dans lequel elle entre sera plus grande, toutes choses égales d'ailleurs. Il y aura nécessairement une secousse quelconque, puisqu'une masse d'eau en repos recevra une percussion brusque. Mais si la section dont il s'agit est assez grande, la quantité de travail perdu pour produire la force vive précitée peut être très petite. Si le tuyau de conduite est très long, chaque tranche qui en sortira pourra être considérée comme perdant sa force vive à son entrée dans la grande masse d'eau. Mais on voit que le cas est très différent de celui où la colonne liquide en rencontrerait une en repos qui serait elle-même contenue dans un tuyau de même diamètre.

Ces considérations paraissent de nature à bien montrer comment, dans les dispositions analogues à celles dont je viens de parler, se comporte la force vive d'une colonne d'eau en mouvement quand on veut en profiter pour faire rentrer de l'eau au bief supérieur. Un tube vertical de *sûreté* étant, comme je l'ai dit, posé entre les deux soupapes, lorsqu'on interrompra la communication entre le grand tuyau de conduite et le bief inférieur pour l'établir entre ce tuyau et le bief supérieur, la colonne liquide en mouvement tendra à monter dans ce tube. Si donc on avait à craindre un effet quelconque de coup de bélier sur l'eau du réservoir, la colonne liquide trouvant une issue latérale, cela changerait l'état de la question, surtout dans le cas où la soupape d'aval serait à l'extrémité du tuyau de conduite.

Dans ces conditions, il ne monterait pas une quantité d'eau bien sensible dans le tube de sûreté, au-dessus du niveau du bief inférieur tant que la soupape d'aval serait ouverte; il y aurait même plutôt sans doute une baisse provenant de la communication latérale du mouvement de l'eau, sauf une légère percussion pouvant provenir de quelques mouvements obliques. Quand cette soupape serait fermée, l'eau s'éleverait

tout naturellement dans ce tube. J'ai expliqué, pour une autre forme de l'appareil, que cette ascension faisait soulever un clapet, lorsqu'il y en avait un, afin d'introduire de l'eau dans le bief d'amont. Or, quand la communication avec ce bief s'établit, sans clapet, au moyen de deux *tuyaux-soupapes* précités, en même temps que la communication avec l'autre bief est interrompue, voyons si l'eau de celui d'amont pourra entrer dans le tuyau de conduite. La colonne liquide supposée d'une grande longueur étant en mouvement dans celui-ci, l'eau d'amont ne pourrait y pénétrer qu'en *perçant* cette colonne, mais cette dernière continue son mouvement. Il ne peut donc pas y avoir de coup de bélier provenant d'une introduction de ce genre, puisque, s'il y en avait un, le grand effort qui en résulterait empêcherait précisément l'eau d'amont d'entrer dans le système.

Si, au contraire, c'était la soupape du bief d'amont qui fût à l'extrémité du tuyau de conduite horizontal, il monterait une certaine quantité d'eau dans le tube de sûreté au-dessus du niveau du bief inférieur pendant l'écoulement de l'eau motrice dans ce dernier. A l'instant où la communication avec ce bief serait interrompue, afin d'être établie avec celui d'amont, le cas ne serait pas aussi favorable que pour la disposition précédente des soupapes annulaires, puisque le liquide ne monterait dans le tube de sûreté qu'en mettant en mouvement la quantité d'eau quelconque qui y serait déjà. Dans l'autre disposition, il y aurait bien toujours une petite colonne liquide à soulever dans le tube de sûreté; mais, comme je l'ai expliqué, elle serait tout au plus sans doute comprise entre l'arête supérieure du tuyau horizontal et le niveau de l'eau du bief inférieur.

Les deux orifices étant entrouverts ensemble pendant quelques instants, très courts, il est vrai, mais enfin aucun n'étant bouché d'une manière tout à fait instantanée, il n'y aurait pas autant d'inconvénient qu'on pourrait le croire au premier aperçu. Des expériences en grand très rassurantes, rela-

tivement à ce sujet, ont été exécutées sur des manœuvres faites quand la colonne liquide, au moment où le tube d'aval redescendait, rencontrait une certaine quantité d'eau qui avait été soutenue au-dessus du niveau du bief d'aval par la percussion de la nappe annulaire de sortie pendant la levée de ce tube. Mais enfin, si l'on emploie des soupapes annulaires à axe horizontal conduites l'une par l'autre, il est rationnel de mettre à l'extrémité du tuyau horizontal celle qui doit verser l'eau au bief inférieur.

Sous ce rapport, et même abstraction faite de l'utilité immédiate qu'elle peut avoir, la discussion précédente me paraît intéressante pour fixer les idées sur les principes. Ainsi, l'on voit qu'il en résulte une raison de plus pour préférer à la disposition générale du tuyau de conduite exécuté à l'écluse de l'Aubois, celle qui est représentée sur la planche VI.

Développements relatifs à l'accélération du service des écluses de navigation.

On m'avait depuis longtemps donné l'idée de proposer pour une écluse en construction de ménager une grande partie du tuyau de conduite dans un des bajoyers. Mais quelques ingénieurs craignaient qu'il n'en résultât des inconvénients pour la solidité des constructions, ces craintes ne se sont pas réalisées.

Quand on a construit l'écluse de Troussey, sur le canal de l'Est, l'administration des ponts et chaussées a fait ménager ainsi dans un des bajoyers un grand tuyau de conduite, pièce principale de mon système d'épargne. Les expériences faites à l'écluse de l'Aubois n'ayant pas été complétées assez tôt, on a employé des machines hydrauliques élévatoires connues pour alimenter le bief sans s'occuper d'épargner les éclusées. Je ne proposerais donc pas aujourd'hui d'achever l'appareil

dans cette localité, si je n'avais pas trouvé des moyens d'utiliser le système de manière à accélérer le service des écluses de navigation, tout en conservant la possibilité de l'employer, sans y rien changer, pour épargner l'eau. Il est essentiel de remarquer que, pour ce tuyau, on a fait bien moins de maçonneries qu'on ne pourrait le croire d'après la planche VI, dont l'objet est seulement de montrer quelle devrait être la disposition générale pour une écluse déjà construite. Il est résulté qu'à l'écluse de Troussey, la construction du tuyau de conduite en maçonnerie dont il s'agit n'a augmenté que de 2,000 francs environ la dépense de l'établissement d'un des bajoyers. Il n'est d'ailleurs résulté aucun inconvénient de cette construction faite il y a près de six ans.

En indiquant ci-dessus les moyens de substituer la pression latérale de l'eau à la percussion employée sur certains canaux quand on y ouvre les ventelles d'amont, pour faire sortir de lui-même un bateau chargé du sas au bief inférieur, j'ai oublié une remarque essentielle. Lorsque le bateau s'est engagé sur le seuil des portes d'aval, il occupe presque entièrement la section, il est donc réellement dans de bonnes conditions pour être poussé à l'arrière par l'eau, qui se gonfle graduellement, comme je l'ai expliqué, au moyen d'une manœuvre de la machine de remplissage. Lorsqu'un bateau montant sort de l'écluse pour entrer au bief supérieur, il est encore bien plus essentiel de faire observer, à cause de l'épaisseur de la couche d'eau qui est alors au-dessous de lui, que, dès l'instant où il est engagé sur le seuil des portes d'amont, il bouche aussi presque entièrement le passage.

Si, pour assurer sa sortie au bief supérieur, on empêche les portes d'amont de s'ouvrir pendant quelques instants, il se produira un phénomène d'écrasement de la surface liquide ayant de l'analogue avec celui sur lequel j'ai fait des observations en levant brusquement une vanne à l'extrémité d'un canal. (Voir pages 314 à 317 de la première partie.) Supposons d'abord qu'il n'y ait pas de bateau dans l'écluse. Le cas

ne sera pas tout à fait le même, parce que l'eau pourra entrer aux deux extrémités du sas pendant que la surface tendra à s'écraser à cause de l'ouverture des portes d'amont.

S'il y a un grand bateau chargé, il se penchera du côté d'amont, et, comme il sera obligé d'imprimer de la vitesse au matelas d'eau qui est au-dessous de lui, il y a lieu d'espérer, en vertu de l'inertie, que le mouvement d'une faible inclinaison en avant se fera d'une manière convenable. L'exhaussement de l'eau dans le sas au-dessus du niveau du bief supérieur n'aura pas besoin, sans doute, d'être bien grand pour que les portes d'amont s'ouvrent assez franchement. La pression qui résultera de cet exhaussement s'exercera d'abord sur toute la hauteur de ces portes. Quand le bateau sera vide, le phénomène paraît devoir se rapprocher davantage de celui de l'écrasement graduel, sur lequel j'ai fait les observations précitées.

Dès l'instant où les grands bateaux chargés seront engagés sur le seuil des portes d'amont, si l'eau arrive encore par le tuyau de conduite près de ces portes, elle tendra convenablement, quoiqu'elle ait à se détourner, à augmenter ou à entretenir jusqu'à un certain point le gonflement à l'arrière du bateau. A l'écluse de Troussey, le tuyau de conduite a, il est vrai, une section beaucoup moindre que celle de l'aqueduc qui suffit en Belgique pour faire ouvrir d'elles-mêmes les portes d'amont et faire entrer de lui-même le bateau au bief supérieur, sans qu'on soit obligé d'empêcher pendant quelques instants ces portes de commencer à s'ouvrir.

Mais si l'eau arrivait par les deux extrémités du sas, les choses, quant à la sortie du bateau, se passeraient sans doute, sauf les résistances passives dans les limites de ce que je viens d'expliquer, à peu près comme pour le cas où celle du tuyau de conduite serait double, et où l'eau n'entrerait que par un seul orifice dans le sas.

L'eau arrivant derrière le bateau dans une des enclaves des portes d'aval agira, il est vrai, directement sur lui; mais

on voit comment celle qui entrera par l'autre extrémité de l'écluse agira aussi avec avantage pour le faire sortir.

Voici encore quelques explications relatives à la sortie d'un grand bateau chargé du sas au bief d'aval. On verra plus loin, d'après les tableaux d'expériences, que, si l'eau dans l'écluse est au niveau de celle de ce bief, une très petite quantité de liquide tirée de celui d'amont suffit dans la première période, quand on remplit le sas, pour faire monter sur toute la section horizontale de celui-ci une épaisseur moyenne d'eau d'une vingtaine de centimètres.

L'expérience était faite avec un grand bateau chargé dans l'écluse. Le tuyau de conduite débouchant dans l'enclave d'une des portes d'aval à l'écluse de l'Aubois, il n'a pas été possible de voir immédiatement la manière dont les choses se seraient passées si ce tuyau de conduite avait débouché aussi dans l'autre extrémité du sas et si, les portes d'aval étant ouvertes, l'orifice qui est dans l'enclave précitée avait été barré par l'une d'elles.

Mais il résulte des oscillations observées aux deux extrémités de l'écluse quand les portes sont fermées, et qui obligent même à prendre des précautions pour éviter le mouvement de va-et-vient des bateaux, que cette masse d'eau considérable arrivant derrière le grand bateau chargé, agira en vertu d'un mode d'ascension particulier. En effet, il résistera par son inertie, et la tranche d'eau qui sera au-dessous de lui n'aura en général que l'épaisseur nécessaire pour éviter qu'il touche le fond. Cette tranche serait donc obligée de prendre des vitesses assez grandes pour empêcher celle qui arrive derrière le bateau de se gonfler d'une manière notable. Or, ces vitesses ne peuvent être engendrées que par le gonflement qu'on veut précisément obtenir par cette manœuvre. Ainsi les choses seront disposées avantageusement, quant au mode d'action de la pression latérale, qui tendra à faire sortir le bateau de l'écluse, puisque, même dans l'état actuel des choses, les mouvements qui lui sont imprimés, sans que les por-

tes soient ouvertes, obligent à prendre certaines précautions, quand l'eau n'arrive que par une des extrémités du sas.

J'ai pris pour exemple d'application l'écluse de Troussey parce qu'il y a déjà un tuyau de conduite ménagé dans l'un de ses bajoyers. Mais la navigation n'y est pas encore assez active pour qu'on puisse proposer de construire l'appareil seulement afin d'accélérer le service. Depuis que ce qui précède est imprimé, on a ajouté à droite de la planche VI un plan de la disposition qui pourrait être proposée, soit pour cette écluse, soit dans des conditions où la navigation serait assez active pour mériter qu'on en fit la dépense. Il ne s'agit pas d'ailleurs ici de dessins d'exécution, mais seulement de fixer les idées sur les dispositions générales dans diverses circonstances.

J'ai donné ci-dessus la description de plusieurs moyens d'accélérer le service à cause de la rapidité des oscillations, quand on pourra employer un bassin d'épargne, en profitant de ce que dans un long tuyau de conduite, les vitesses partant de zéro varient assez graduellement. De sorte qu'on peut faire entrer en très peu de temps une grande quantité d'eau sans que cela ait autant d'inconvénient qu'il en résulterait des vitesses considérables provenant immédiatement de l'ouverture des ventelles ordinaires. J'ai signalé les avantages et les inconvénients des dispositions de ce genre.

Depuis que ce qui précède est imprimé, j'ai retrouvé dans le journal l'*Institut* une note extraite du procès-verbal de la séance de la Société philomathique de Paris du 16 novembre 1844, relative à la combinaison d'une écluse de navigation réunie par un grand tuyau de conduite à un bassin d'épargne que j'appelais *sas latéral.* Voici un extrait de mon ancienne note dont il s'agit : « .... Dans ce système il n'est pas nécessaire que le sas latéral n'ait pas une section plus grande « que celui de *navigation;* et s'il a une section plus grande, la « décharge se fera, en vertu des lois de l'oscillation dans les « siphons à branches de sections inégales, sans que le niveau

« soit obligé de varier de hauteurs aussi grandes dans le sas
« de décharge, soit pendant que l'écluse se vide, soit pendant
« qu'elle se remplit.... »

Cette disposition que j'avais oubliée peut avoir ses avantages. Il n'est pas nécessaire, en effet, que le fond du bassin d'épargne soit aussi bas que je l'avais supposé pour le cas où il n'y aurait qu'un seul bassin latéral de sections moindres que celles de l'écluse. En faisant le calcul au moyen de la formule qui peut servir pour toutes ces dispositions, on trouve que ce réservoir latéral devant contenir alternativement toute la fraction de l'éclusée qui rentrera dans le sas, peut avoir son fond notablement au-dessus du niveau de l'eau du bief d'aval. Il en résulte qu'on peut diminuer la profondeur des fondations qui serait nécessaire pour avoir un coude arrondi. Il y aurait d'ailleurs de l'avantage, quant aux filtrations, en ce que cela permettrait d'avoir dans le bassin d'épargne une hauteur d'eau moindre que pour le cas où, au contraire, la section de ce bassin serait rétrécie. Le choix de ces dispositions dépendrait des localités. J'ai expliqué ci-dessus pourquoi l'on ne devait pas, selon moi, donner au bassin d'épargne une section plus grande que celle de l'écluse, dans l'hypothèse où il devrait se vider alternativement jusqu'au niveau du bief d'aval et se remplir alternativement jusqu'à celui du bief d'amont. Mais je n'entrerai pas dans plus de détails sur les bassins d'épargne préférant en général le jeu des périodes de la machine proprement dite pour les grandes écluses.

Au moment de mettre cette feuille sous presse, je retrouve les dessins à l'échelle de l'aqueduc de Troussey, qui me furent communiqués en 1875. Je fais ajouter à la plandhe VI la coupe transversale de cet aqueduc, tel qu'il avait été étudié par M. Derome, ingénieur des ponts et chaussées, de manière à ne pas compromettre la solidité du bajoyer.

Considérations sur la forme des tubes mobiles.

Depuis que ce qui précède est imprimé on m'a demandé pourquoi je n'avais pas proposé d'évaser le sommet des tubes mobiles à l'écluse de l'Aubois. J'ai dit plus haut qu'il serait utile d'évaser le sommet des tubes verticaux lorsqu'il n'y aurait de mobile que la partie inférieure formée d'une vanne cylindrique ou d'une soupape de Cornwall, une pièce centrale fixe, pouvant d'ailleurs permettre de faire varier, d'une manière convenable, les sections alternativement remplies d'eau. Mais il ne faut pas exagérer l'importance de l'évasement considéré comme ajutage divergent à cette extrémité, par rapport au mouvement de l'eau quand elle rentre au bief supérieur.

Il résulte, en effet, d'observations mentionnées dans la première partie, pages 123 à 125, que, dans certains cas du moins, si les évasements sont trop courts relativement au diamètre, ils sont loin d'avoir, pour un des sens du mouvement, les avantages qui sembleraient, au premier aperçu, provenir du principe des ajutages divergents et qu'il pourrait même en résulter un rétrécissement de la veine liquide à cause des tourbillons latéraux. Or, dans le cas dont il s'agit, les tubes verticaux auront toujours un diamètre considérable, par rapport à leur hauteur. L'utilité de les élargir au sommet, paraît consister surtout en ce que, l'orifice extérieur étant augmenté, il ne sera pas nécesaire que l'eau soit refoulée autant au-dessus afin que ses pressions latérales suffisent pour l'écoulement de la nappe annulaire.

Quand le tube est entièrement mobile, on n'a pas la même liberté pour disposer l'évasement de cette manière. S'il s'agissait d'un tube d'aval graduellement élargi de la base au sommet, lorsqu'on voudrait lever ce tube, l'écluse étant

pleine, il faudrait faire un effort d'autant plus considérable que l'évasement serait plus grand. Or, il faut déjà faire un certain effort pour le soulever à cause de la pression supportée de haut en bas par son anneau inférieur, et il ne serait pas convenable d'augmenter beaucoup le travail de l'éclusier. D'ailleurs l'eau sortant par le sommet des deux tubes, cela diminue l'importance de ces considérations.

Si le tube d'amont était graduellement évasé de bas en haut, la pression de l'eau en communication avec le bief supérieur tendrait à le soulever. Il est maintenu en temps utile sur son siège par la pression du liquide sur son anneau extérieur, dans l'état actuel des choses. On voit, d'après cela, que les évasements graduels de l'un ou l'autre tube, s'il est mobile sur toute sa hauteur, n'auraient qu'une importance très secondaire et pourraient gêner les manœuvres.

Quant aux écluses de *petite navigation*, le cas n'est pas le même pour le tube d'aval, parce qu'il n'est pas aussi difficile de le soulever. Dans une expérience provisoire sur une écluse de ce genre, j'ai élargi sans inconvénient le sommet du tube d'aval.

Ces études ayant principalement pour objet les grandes écluses, on a représenté sur la planche VI des tubes verticaux cylindriques. Il n'y aurait pas d'inconvénient à élargir la partie des tubes qui est un peu au-dessus du niveau du bief supérieur, si le niveau de ce dernier était assez sensiblement constant.

Mais on conçoit que, s'il est variable, et c'est précisément ce qui oblige à tenir les sommets de ces tubes assez au-dessus de ce niveau, cela change l'état de la question.

Ce qui précède suffit d'ailleurs pour indiquer dans quelles limites cette disposition peut être modifiée.

Si l'on ne faisait rentrer l'eau au bief supérieur que par le sommet du tube d'amont, afin d'éviter la dépense d'une voûte, il n'y aurait pas d'inconvénient à évaser la partie du sommet de celui d'aval qui serait au-dessus du niveau de ce bief.

L'eau ne sortant point alors par le sommet de ce tube, le cas serait très différent.

Quant à la marche automatique, si l'eau sortait par le sommet des deux tubes dont les parties supérieures fixes seraient graduellement évasées de bas en haut, la marche automatique dépendant des oscillations en retour serait favorisée pour la vidange; mais pour le remplissage, le tube d'amont ne se lèverait pas de lui-même aussi facilement, parce que les oscillations en retour ne monteraient pas en général aussi haut que si les tubes verticaux étaient cylindriques.

Si les deux tubes étaient conduits l'un par l'autre, ainsi que pour une des manœuvres essayées à l'écluse de l'Aubois, il ne serait pas indispensable que leurs anneaux inférieurs fussent alternativement pressés par l'eau, comme à cette écluse où l'on a voulu pouvoir étudier une marche en partie automatique, et les conditions seraient très différentes. Mais les évasements, outre les inconvénients analogues à ceux dont j'ai parlé, auraient celui de faire perdre à chaque changement de période, à cause de la vidange des tubes verticaux, une quantité d'eau qui serait augmentée en vertu même de ces évasements. Dans ce cas d'ailleurs il serait convenable, comme je l'ai expliqué ci-dessus, de diminuer autant que possible les sections des tubes mobiles par des pièces fixes ne laissant de libre que l'espace nécessaire pour éviter les coups de bélier, les évasements n'auraient donc plus les résultats précités.

On m'a demandé aussi pourquoi je ne proposais pas de mettre le siège de chaque tube mobile au fond d'un entonnoir plus prononcé qu'à l'écluse de l'Aubois. Je ferai remarquer d'abord que, si cet entonnoir était aussi aigu que celui qui serait convenable pour diminuer la *contraction* de la veine liquide à son entrée dans le tuyau de conduite, je craindrais les engorgements qui pourraient provenir du mouvement des herbes et qui ne se présentent point à cette écluse.

Je ferai remarquer aussi que, pour découvrir suffisamment l'entrée du tuyau de conduite, il faudrait lever beaucoup

plus haut chaque tube mobile. Or, si les diamètres de ces tubes sont en général d'une grandeur très comparable à celle de la chute de l'écluse, on conçoit qu'il serait nécessaire de les lever à des hauteurs gênantes pour profiter convenablement des effets de la suppression de la *contraction* de la veine liquide. Il est d'ailleurs bien essentiel de rappeler que la perte de force vive provenant de cette contraction est beaucoup moins importante que celle qui résulte de la perte de vitesse à la même extrémité, lorsque, dans un mouvement en sens contraire, l'eau sort du tuyau de conduite.

Il y a sans doute quelques tâtonnements à faire pour déterminer la forme la plus convenable de l'espèce d'entonnoir au fond duquel doit être le siège de chaque tube. Mais ce point est bien plus secondaire qu'il ne le semble au premier aperçu, d'autant plus que, dans la pratique, il faut pouvoir lever le tube plusieurs fois de suite, de manière à éviter de gêner le mouvement de l'eau, qui arrivera sans doute plus obliquement que si cette pièce n'était pas au-dessus de l'orifice.

Le cas serait différent, il est vrai, s'il ne s'agissait que de lever le tube une seule fois pour transvaser l'eau au moyen d'un bassin d'épargne. Mais, en général, je regarde comme essentiel d'évaser graduellement les extrémités, pour profiter du principe des ajutages divergents, d'autant plus que l'élargissement étant d'ailleurs aussi une cause de diminution de vitesse pour le sens du mouvement qui fait entrer l'eau dans le système, cela diminue déjà la perte de force vive résultant de la contraction. La difficulté de faire fonctionner dans les premiers essais des tubes de très grands diamètres m'a empêché de proposer d'évaser l'extrémité sur laquelle sont les tubes mobiles à l'écluse de l'Aubois. On a dessiné sur la planche VI leurs anneaux inférieurs, avec les sections arrondies proposées par l'administration du canal. Les surfaces planes que j'avais employées dans d'autres appareils garderont peut-être l'eau encore plus sûrement.

Expériences sur le rendement de l'appareil considéré sans bassin d'épargne à l'écluse de l'Aubois.

L'administration du canal avait proposé un moyen de mesurer ce rendement en faisant des observations sur chaque période de remplissage ou de vidange, ce qui permet de se rendre compte de la marche des effets. Il en résulte quelques chances d'erreur que je signalerai plus loin en montrant comment on peut en déterminer les limites. Il a été indispensable pour employer cette méthode d'avoir dans l'écluse un bateau chargé des plus grandes dimensions, afin de diminuer les fluctuations de l'eau, de manière à pouvoir prendre des moyennes. Je vais d'abord reproduire textuellement, comme pièce justificative, le rapport fait à l'Institut sur les premiers rendements obtenus au moyen de cette méthode, dont je discuterai ensuite les résultats relativement à des études faites sur diverses manœuvres.

A l'époque où l'on a construit cet appareil à l'écluse de l'Aubois, les bateaux restaient en beaucoup plus grand nombre qu'aujourd'hui près de cette écluse, parce qu'on y percevait le péage qu'on reçoit maintenant à l'extrémité du canal. Il en résultait que dans un bief très court il pouvait se trouver en même temps un certain nombre de bateaux, ce qui n'était pas sans quelque danger. Ces conditions étant changées, on n'a plus aucun besoin sérieux d'épargner l'eau à cette écluse. D'ailleurs, quand on a construit l'appareil, je ne me dissimulais pas que son application dans cette localité ne pouvait avoir qu'une importance très secondaire. Mais on sait combien il est difficile, pour un système entièrement nouveau, de trouver un ingénieur qui veuille bien s'en charger, et je m'empressai de profiter de la bienveillance de M. l'ingénieur en chef de Marne, malgré les difficultés d'une

nature toute spéciale que présentait cette localité. Il est donc bien entendu que, dans l'état actuel des choses, l'appareil qui y est construit a seulement pour objet de faire des études sur ce nouveau système. On a vu plus haut comment j'en ai profité pour le perfectionner.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXVIII, séance du 18 janvier 1869.

Rapport sur une communication de M. Vallès, faite le 21 décembre 1868, sous ce titre :

Expériences faites à l'écluse de l'Aubois, pour déterminer l'effet utile de l'appareil à l'aide duquel M. de Caligny *diminue dans une proportion considérable la consommation d'eau dans les canaux de navigation.*

(Commissaires : MM. Combes, Phillips, de Saint-Venant, rapporteur.)

« M. Vallès, inspecteur général honoraire des ponts et chaussées, connu par divers ouvrages de mathématiques et d'hydrologie, avait fait partie, en 1866, d'une commission d'ingénieurs et d'inspecteurs du même corps, chargée de rendre compte d'expériences officielles exécutées en grand aux bassins de Chaillot, sur les effets de l'appareil inventé par M. de Caligny, et dont nous venons de dire l'objet. Son installation avait été ordonnée par M. le ministre des travaux publics, à la suite de rapports de deux précédentes commissions, appelées en 1849 et en 1866 à assister à des épreuves faites en petit.

« D'après l'avis très favorable de la nouvelle commission, dont M. Vallès était le rapporteur (1), M. de Caligny a été invité par le ministre à rechercher, sur un des canaux de la France, une localité convenable, et à concerter avec les ingénieurs les dispositions à

(1) « Le résumé officiel de son Rapport a été imprimé au *Journal de Mathématiques* de M. Liouville, en 1866, et au *Bulletin de la Société Philomatique* du 2 février 1867. » (Voir ci-dessus ce Résumé officiel.)

prendre pour la construction d'un appareil destiné à fonctionner habituellement.

« Le choix a porté sur l'écluse de l'Aubois, du canal latéral à la Loire (près de la célèbre usine de Fourchambault), parce que le niveau de son bief d'amont, qui a très peu de longueur, est sujet à baisser notablement à chaque passage de bateau, de sorte qu'il importait, là plus qu'ailleurs, d'économiser beaucoup la dépense de volume d'eau que tout passage exige.

« M. l'inspecteur Vallès, désireux de reconnaître l'établissement définitivement donné à l'appareil qui avait fait dans un état provisoire l'objet de son étude, et d'en déterminer exactement l'effet utile, s'est rendu en 1868 à l'écluse de l'Aubois, où les travaux venaient d'être exécutés. Il y a séjourné une semaine, formant des agents à la double manœuvre du remplissage et de la vidange du sas, et se livrant journellement à des expériences relatives d'abord à la vidange.

« Il vous en a adressé les résultats le 21 décembre, par les mains de M. le Maréchal Vaillant. Sa communication a été renvoyée à une commission composée de M. Combes, de M. Phillips et de moi. Et, depuis quelques jours, M. Vallès nous a remis, pour l'y annexer, deux compléments.

« Le premier donne un tableau des résultats analogues relatifs au remplissage, observés depuis son retour à Paris, et conformément à ses instructions, par M. Perrault, conducteur des ponts et chaussées. Les chiffres que donne cet agent intelligent et soigneux (1) sont les mêmes que ceux qui figurent dans une lettre adressée à l'inventeur par M. de Marne, ingénieur en chef du canal, certifiant ainsi qu'on peut les regarder comme exacts.

« Le deuxième complément donne, avec une description des procédés de mesurage, un détail, que nous lui avons demandé, des chiffres relatifs à la vidange, dont M. Vallès n'avait d'abord présenté qu'une moyenne générale. Il y a joint les résultats d'observations relatives à une manœuvre qui économise le temps en sacrifiant une partie de l'effet utile : manœuvre particulière dont on pourra faire usage dans des moments de presse, si alors l'eau ne manque pas.

« On voit qu'il n'est pas précisément question, comme en 1849, 1860 et 1866, d'essayer un système nouvellement inventé et de

(1) « M. le conducteur Perrault s'est employé à toutes les opérations et à une intelligente mise en train du procédé avec un dévouement digne d'éloges.

s'assurer de la possibilité de son usage. L'appareil de M. de Caligny reçoit un premier emploi, et il s'agit aujourd'hui d'en apprécier les avantages, plus exactement que jusqu'ici on n'a pu faire.

« Commençons par en donner quelque idée d'après la description très claire qu'en fait M. Vallès, en parlant d'abord des autres appareils ou procédés qui ont été précédemment proposés pour le même objet.

« Dans son état habituel, le sas de toute écluse reste généralement vide. On le remplit, puis on le vide de nouveau pour chaque passage de bateau, soit descendant, soit montant. Cette manœuvre consomme, c'est-à-dire fait descendre du bief d'amont au bief d'aval, un volume d'eau égal à la capacité du sas.

« Pour diminuer cette consommation, à laquelle l'alimentation supérieure ne suffit pas toujours, divers moyens ont été proposés. Il en est un qui date de 1643, dont on a, depuis, fait quelque usage en Angleterre. C'est celui de l'écluse de Bouzingues, en Belgique, à savoir : la construction et l'emploi d'un *bassin d'épargne* latéral au sas et d'une superficie au moins égale. On y met en réserve (comme dit M. Minard dans son *Cours de navigation intérieure*) le tiers du volume d'eau de chaque éclusée pour en faire profiter l'éclusée suivante ; avec deux bassins on en réserverait la moitié, et, avec trois (toujours de la même superficie que le sas) les trois cinquièmes. Mais les frais de ce procédé et ses inconvénients, entre autres celui de ralentir sensiblement la manœuvre, ont empêché d'en faire en France aucun usage. On n'a pas non plus suivi le conseil que donnait feu Girard, de multiplier les écluses en atténuant leurs chutes.

Divers autres procédés ont été successivement proposés sans avoir jamais été l'objet d'essais en grand. Ainsi, MM. Solage et Bossut rendaient le sas mobile. M. Burdin fermait par un couvercle un grand bassin latéral où l'eau entrait et dont elle sortait avec l'aide d'un piston. M. de Betancourt, ingénieur français d'origine, qui était au service de l'Espagne au commencement de ce siècle, déterminait l'enfoncement, aussi dans un grand bassin, d'un volumineux flotteur, faisant passer l'eau de ce bassin dans le sas pour le remplir, et il l'en retirait pour que le sas s'y vidât. M. Busby, ingénieur anglais, prenait, en 1813, une patente (*Repertory of Arts*, t. XXIII et XXIV) où le flotteur était creux, à deux compartiments superposés, recevant par des siphons, l'un de l'eau d'amont, l'autre de l'eau d'aval, et restituant ensuite ces quantités d'eau presque entières à leurs biefs respectifs. C'est ce même procédé qui, ingé-

nieusement perfectionné en 1843, ou pour mieux dire inventé à nouveau et généralisé pour des écluses doubles, etc., par M. l'ingénieur civil D. Girard, lui a fait décerner en 1845 le grand prix de mécanique, sur le rapport très favorable de M. Poncelet, qui, après y avoir indiqué une amélioration de détail, s'est plu à faire une étude approfondie et savante de ce système qui semble porter l'économie d'eau à son maximum. L'Administration en fit l'acquisition, mais elle n'en a pas exécuté de spécimen.

« L'appareil de M. de Caligny, ou de l'écluse de l'Aubois, que nous avons à examiner ici, est fondé sur un tout autre principe. Il produit son économie d'eau immédiatement ou pour l'éclusée même qui est en jeu, au lieu d'opérer comme le bassin de Bouzingues, pour l'éclusée suivante, une réserve que des fuites peuvent diminuer sensiblement.

« Il revient à user, de suite, du travail produit par la chute de l'eau soit du bief d'amont dans le sas, soit du sas dans le bief d'aval, pour faire remonter à un niveau supérieur une certaine autre quantité de ce liquide. Tout récepteur hydraulique, tel que serait une roue à aubes en y adaptant toute machine élévatoire telle qu'une pompe, produirait plus ou moins un effet de ce genre; mais il importait que l'appareil adopté fût simple, d'un bon rendement malgré la variabilité de la force motrice, d'une manœuvre facile et de courte durée, enfin peu ou point sujet aux dérangements, et susceptible de laisser passer de l'eau chargée de vase ou de menus corps flottants, sans jamais s'encombrer. Les expériences de 1866 ont fait présumer que l'appareil exécuté en 1868 à l'Aubois, et que nous avons à apprécier, remplirait ces conditions. Il consiste essentiellement : 1° en un très gros tuyau horizontal en maçonnerie, placé en contre-bas de la tenue d'eau d'aval et débouchant dans le sas vers l'extrémité inférieure de celui-ci; 2° en un fossé de décharge commençant aussi vers l'amont et allant déboucher en aval au-dessous de l'écluse. Les seules pièces mobiles sont deux manchons ou larges tubes verticaux en tôle, de faible hauteur, ouverts aux deux extrémités, et reposant sur deux ouvertures circulaires de même diamètre faites au ciel du tuyau horizontal. Si leur manœuvre se fait entièrement à la main, l'éclusier les soulève sans effort avec des leviers du premier genre, portant d'un côté un secteur sur lequel s'applique une chaîne de suspension, et de l'autre une tiraude avec contre-poids. Bien que ces deux tubes verticaux soient placés très proches l'un de l'autre, l'un d'eux peut être appelé *tube d'amont*, parce que son soulèvement fait descendre

dans le tuyau horizontal l'eau prise à l'amont, dont il est entouré ; l'autre sera nommé *tube d'aval*, parce que l'espace qui entoure sa paroi extérieure se trouve en communication avec le fossé de décharge qui est comme une annexe du bief d'aval.

« S'agit-il de vider le sas supposé déjà rempli ? On soulève le tube dit *d'aval* ; les eaux du sas parcourent le tuyau et se précipitent dans le fossé de décharge en passant de tous côtés par l'ouverture annulaire que produit le soulèvement de cette espèce de soupape sans pression. Or, si, après avoir tenu le tube ainsi soulevé pendant quelques secondes, on le laisse retomber sur son siège, l'eau du long tuyau horizontal, animée d'une grande vitesse, ne pouvant continuer de s'échapper par l'ouverture qui lui était faite et qu'on vient d'intercepter, monte, en vertu de son inertie ou de sa force vive acquise, par l'intérieur de ce tube d'aval, et aussi du tube d'amont, et cela sans brusquerie et sans coup de bélier. Il en résulte, si les bouts supérieurs de ces deux tubes s'élèvent à quelques centimètres au-dessus du niveau de l'eau d'amont, et s'ils sont entourés d'une bâche convenablement disposée, qu'une portion de l'eau *monte du sas dans le bief d'amont de l'écluse*. Ainsi commence à se trouver utilisé le travail de la descente d'eau opérée.

« Lorsque l'eau a cessé de monter ainsi et que ce qui en reste dans les tubes est redescendu par une oscillation en retour, on soulève de nouveau le tube d'aval, puis au bout de quelques secondes on le laisse retomber. Il en résulte, dans le sas qui est à vider, un nouvel abaissement de l'eau, dont une première portion descend dans le bief d'aval, et dont ensuite une autre portion monte encore dans le bief d'amont. Et l'on continue cette manœuvre périodique jusqu'à ce que l'ascension d'eau qu'on veut obtenir soit devenue insignifiante pour l'épargne ; alors on laisse écouler librement vers l'aval, en tenant le tube soulevé, le reste de l'eau du sas.

« S'agit-il, au contraire, de remplir le sas supposé vide ? On le fait par une opération inverse et qui, malgré sa simplicité, est si singulière dans son effet, que l'on a vu des ingénieurs expérimentés rester longtemps sans la comprendre. On soulève le tube dit *d'amont* ; l'eau du bief supérieur se précipite, par l'espace annulaire ainsi ouvert, dans le long tuyau, et de là dans le sas. Au bout de quelques secondes on laisse retomber le tube d'amont sur son siège et on soulève le tube d'aval ; l'eau qui, dans le long tuyau, a acquis une grande vitesse, continue sa marche *et fait dans ce tuyau un vide* qui appelle, par l'ouverture du dessous du tube d'aval soulevé, l'eau du fossé de décharge, c'est-à-dire *l'eau du bief*

d'aval. Quand ce reflux artificiel cesse, on laisse retomber le tube d'aval et on soulève de nouveau le tube d'amont, et ainsi de suite. A chacune de ces doubles opérations successives, le sas se remplit, comme on voit, partie avec de l'eau prise en amont à un niveau supérieur, et partie avec de l'eau *prise en aval à un niveau inférieur*, grâce à cette espèce de machine pneumatique, ou de pompe aspirante sans piston ni clapet, dans laquelle se transforme spontanément le long tuyau horizontal chaque fois qu'on abaisse le tube d'aval après l'avoir tenu quelques instants soulevé.

« L'épargne d'eau produite par l'appareil ainsi décrit sera la somme des quantités du fluide soulevé du bief d'aval dans le sas pendant le remplissage, et du fluide soulevé du sas dans le bief d'amont pendant la vidange, car ce sera là ce qu'un passage de bateau exigera de moins que l'éclusée complète, habituellement dépensée. Et le *rendement*, ou effet utile proportionnel, aura pour mesure la fraction obtenue en divisant cette somme par le volume de l'éclusée, ou, ce qui revient au même, en divisant par la hauteur de la chute la somme des hauteurs d'eau du sas : les unes obtenues du bief d'aval, les autres passées au bief d'amont. Ces hauteurs sont celles d'abaissement et d'élévation qu'on mesure dans le sas, les premières pendant qu'un tube est levé, les autres pendant qu'il est baissé.

« M. Vallès a fait, pour obtenir ces hauteurs, une suite nombreuse d'expériences de vidange du sas, dans lesquelles le nombre des périodes, c'est-à-dire des soulèvements et des abaissements du tube d'aval, a varié de dix à douze.

« Il donne, dans sa Note de décembre, un tableau des abaissements totaux qui en sont résultés dans l'eau du sas pour les huit premières expériences faites, afin seulement de montrer leur presque constance, car ils n'ont guère varié que de $1^m,70$ à $1^m,75$, la chute totale de l'écluse étant de $2^m,40$ à $2^m,45$. Et, dans sa deuxième Note complémentaire, il fournit le détail des abaissements partiels ayant lieu pendant chacune des moitiés des douze périodes dont se sont composées les quatre expériences les plus sûres. Ils ont été observés, comme il le dit, en introduisant un bateau dans l'écluse pour diminuer l'agitation du fluide, et en comparant, après chaque demi-période, à l'aide de deux perches, la hauteur des bords du bateau avec celle du sommet des bajoyers.

» Il donne les abaissements observés à l'extrémité supérieure du sas et ceux qui ont été observés à l'extrémité inférieure ; ceux-ci sont beaucoup plus forts que ceux-là dans les premières périodes ;

ils ne deviennent sensiblement égaux que dans les dernières. Ces différences prouvent simplement que l'eau dans le sas avait une pente très sensible pendant les forts écoulements, comme naturellement cela devait être; et la demi-somme des deux abaissements mesurés donnait ce qu'il fallait pour calculer les volumes.

« M. Vallès regrette de ne pouvoir faire connaître en particulier les nombres appartenant à chacune des quatre expériences dont on parle ; il n'en a pas conservé la note, les moyennes partielles pour toutes quatre ayant été composées sur les lieux avec des nombres qu'il se rappelle très bien avoir différé très peu d'une expérienee à l'autre pour les mêmes périodes. Ces moyennes partielles, données *pour chaque perche,* peuvent donc être considérées comme fournissant tout ce qu'il faut avec une approximation suffisante; surtout quand on compare le résultat avec celui de Chaillot où l'on avait d'autres moyens d'observation et en même temps des causes de perte d'effet ; et aussi, en faisant la comparaison avec ce qui a pu être mesuré lors du remplissage du sas, où il y a plus de régularité et moins d'agitation.

« Quant aux chiffres relatifs au remplissage, ils sont donnés avec tout leur détail dans le premier complément, pour deux expériences à huit périodes. Il y a eu un tel accord entre ces deux expériences, que le conducteur Perrault a cru iuutile d'en faire d'autres.

« Il résulte de ces moyennes générales que la portion de l'effet utile, ou rendement, obtenue pendant le

remplissage est. . . . . $\frac{1^m,001}{2^m,43} = \ldots$ 0,412

et la portion pendant la vidange est

moyennement. . . . . $\frac{0^m,926}{2^m,40} = \ldots$ 0,386

Effet utile total. 0,798

soit 0,80 ou les *quatre cinquièmes.*

« M. Vallès avait prévu, dès avant les dernières expériences, que l'effet utile partiel devait être plus considérable pendant le remplissage que pendant la vidange. Cela tient à ce que la variabilité du niveau des eaux dans le bief d'amont, exceptionnellement très court, comme on a dit, a obligé d'élever le bord supérieur des tubes à 10 centimètres plus haut qu'il ne faudrait dans les localités où les tenues d'eau sont à l'état ordinaire. Il pense que dans ces localités normales on obtendrait bien 0,83 au lieu de 0,80.

« Dans le deuxième complément, M. Vallès rend compte d'expé-

riences ayant pour objet d'économiser le temps en sacrifiant une partie de l'effet utile, ce qui est possible à certaines époques de l'année. Alors, en bornant l'opération à six périodes, il ne fait, en vidant le sas, remonter que $0^m,563$ d'eau en amont, ce qui fait une épargne de. . . . . . . $\frac{0,563}{2,40} = 0,235$.
Si, pendant le remplissage, on suppose par analogie 0,265, l'on a, en additionnant, toujours une épargne de moitié. Mais on n'abrège ainsi le temps que d'une minute et demie, et il paraîtra sans doute généralement préférable de faire la manœuvre complète et toute l'épargne d'eau dont on a présenté une évaluation tout à l'heure.

« Il évalue aussi le rendement de l'appareil envisagé seulement comme machine élévatoire. Pour cela, il multiplie, afin d'avoir les quantités de travail, les volumes fluides par les hauteurs d'ascension ou de descente de leurs centres de gravité. Il trouve que dans la manœuvre de la vidange le rendement a été de 76 p. 100, et que dans celle du remplissage il a été de 81. Nous n'insistons point sur cette considération, qui est étrangère à notre objet principal.

« Mais ce qui intéresse cet objet, c'est la ressource supplémentaire dite *des grandes oscillations finales et initiales*, que l'on tire à volonté du même appareil pour produire une épargne d'eau additionnelle, profitable, comme dans le système de Bouzingues, au passage de bateau qui suivra. Voici en quoi elle consiste, et le résultat de la mesure détaillée que M. Vallès en a faite.

« Quand la manœuvre alternative du soulèvement et de l'abaissement du tube d'aval, pendant la vidange du sas, a cessé de produire des ascensions sensibles d'eau vers l'amont, l'on tient ce tube levé, et ce qui reste d'eau dans le sas se précipite, par l'intermédiaire du long et large tuyau, dans le fossé de décharge qui communique avec l'aval. Si, alors, on laisse se fermer, par une porte de flot qu'on y a établie, l'extrémité inférieure de ce fossé, il résulte de la vitesse acquise, et nonobstant la direction du cours de l'eau, inverse de ce qu'elle est dans le tuyau, *que ce fluide monte, dans le fossé, plus haut qu'il ne se tient ensuite dans le sas d'où il est parti*. Un excès de 15 centimètres a été mesuré pour cet effet, que produit naturellement tout *siphon renversé*. Il s'ensuit, en abaissant alors le tube vertical d'aval pour intercepter la communication avec le sas, que le fossé de décharge fera *bassin d'épargne* pour une certaine tranche d'eau, tranche que l'on emploiera, au passage suivant de bateau, pour remplir d'autant le sas, avant de rien em-

prunter au bief d'amont. Même, alors, par une autre grande oscillation, dite *initiale*, et encore analogue à celles qu'offre un siphon renversé, l'expérience montre que l'eau ainsi introduite dans le sas s'y tient notablement plus haut qu'elle n'est ensuite dans le bassin d'où elle vient, ce qui ajoute encore un peu à l'épargne.

» De même, lors du remplissage, et après que le jeu des tubes a cessé d'aspirer profitablement de l'eau d'aval, si, en achevant de remplir le sas au moyen de la levée du tube d'amont, l'on ferme par une porte de flot l'entrée du petit bassin maçonné qui contient les tubes et qui communique avec le bief d'amont habituellement, la *grande oscillation* finale d'arrivée de son eau dans le sas fait monter dans celui-ci le fluide *plus haut* qu'il ne sera ensuite dans le petit bassin dont nous parlons ; et ce bassin, quand on en abaisse le tube, ne contient plus l'eau qu'à un niveau inférieur à celui du bief d'amont. Il en résulte, dans ce même petit bassin maçonné, une sorte d'*épargne inverse* qui profitera à la vidange du passage suivant, car on y fera arriver naturellement, du sas, la tranche d'eau qui y manque pour atteindre le niveau d'amont, et ce sera autant de moins à envoyer en aval. Une *grande oscillation initiale* aura même lieu alors, avec petit surcroît de profit.

« M. Vallès, qui a mesuré les dénivellations produites par ces quatre grandes oscillations, surtout les finales, en conclut, pour l'épargne supplémentaire qu'elles peuvent fournir, un chiffre de 10 pour 100 du volume de l'éclusée. L'épargne totale due au système serait ainsi de 90 pour 100.

« Un pareil résultat, s'il est confirmé, devrait être attribué à la simplicité de l'appareil, qui ne contient ni clapets ni pistons, et qui ne produit pas de chocs, parce que, comme dans la plupart de ceux de M. de Caligny, l'on s'est interdit toute fermeture de la section transversale du tuyau.

« Son inventeur compte peu, toutefois, sur l'obtention habituelle, dans la pratique des 10 pour 100 dont on vient de parler, parce qu'il peut en résulter du ralentissement dans la manœuvre, et que le temps a aussi besoin d'être épargné. Mais cette économie d'eau éventuelle pourra cependant être recherchée dans les lieux où il y a pénurie d'alimentation, avec des chutes très hautes, comme aux environs des points de partage. Aussi M. Vallès en a toujours fait avec raison l'un des sujets de son examen.

« Maintenant, obtiendra-t-on dans la pratique courante, et sans même compter ce surcroît final possible, les épargnes d'eau qui résultent des expériences ci-dessus? Un éclusier fera-t-il toujours

jouer les tubes dix et douze fois, sans y mettre plus de cinq à six minutes que M. Vallès a comptées, y compris l'achèvement ? Ce procédé, enfin, est-il appelé à devenir usuel dans tous les lieux et dans tous les temps où les voies navigables artificielles souffrent de la pénurie d'eau ?

« Ces questions ne pourront être jugées qu'à la suite d'un usage d'une certaine durée. Elles ne font pas l'objet essentiel de la communication de M. Vallès. Toutefois l'honorable et savant inspecteur général les a traitées en partie et accessoirement. Il énonce que des signes non équivoques caractérisent l'instant où il faut abaisser les tubes après les avoir tenus levés, de manière à obtenir dans chaque période le plus grand effet possible. On sait qu'en général les maxima restent quelque temps stationnaires, ou qu'ils varient fort peu pour des variations très sensibles des éléments dont ils dépendent. On sait aussi que dans des manœuvres délicates, et à cause même de leur délicatesse un peu scientifique qui souvent flatte et simule l'esprit des simples ouvriers, ils acquièrent quelquefois en peu de temps l'instinct pratique du mieux possible.

« D'ailleurs, après les deux ou trois premières périodes, où la manœuvre des tubes doit être opérée à la main, une expérience faite à Saint-Lô a prouvé que le reste pouvait être opéré *automatiquement* par une force de *succion* en rendant légèrement tronconique le bas des tubes et en le garnissant d'un rebord saillant et relevé, comme dans une autre machine déjà connue, qui a valu au même inventeur des récompenses aux deux dernières expositions. Enfin, quant au temps de la manœuvre, M. Vallès a fait observer que les larges ouvertures, de 1^{m}, 40 de diamètre, que découvre la levée des tubes, donnent un passage incomparablement plus prompt aux eaux que les ventelles perçant habituellement les portes dont elles compliquent la construction, et qui ne se manœuvrent qu'à l'aide de puissants crics ; de sorte que, d'après lui, la considération du temps, qui fait le côté faible des autres systèmes mentionnés plus haut, ne paraît point défavorable à celui dont on vient de s'occuper.

« En conséquence, vos commissaires, en faisant des réserves relativement à des points que l'usage seul pourra résoudre, et à de légères incertitudes que laissent les mesurages opérés, estiment que le système d'écluse à épargne d'eau établi sur le canal latéral de la Loire contre la rivière de l'Aubois est ingénieux, et scientifiquement fondé; qu'il donne, en supposant même que l'on dût réduire sensiblement les chiffres annoncés, un effet utile remarquable, avec des chances de perfectionnements ultérieurs. Et ils vous pro-

posent de remercier M. Vallès de vous avoir fait part de considérations aussi intéressantes au point de vue de l'art des ouvrages de navigation intérieure. »

« Les conclusions de ce rapport sont adoptées. »

Détails relatifs aux expériences mentionnées dans le rapport précédent.

Avant de reproduire un tableau d'expériences mentionné dans le rapport à l'Institut, je dois faire quelques remarques. Il y a moins de régularité dans les premières expériences de vidange faites à cette écluse, quoique les résultats définitifs ne fussent pas très différents pour l'une et l'autre de ces deux opérations avant que le tube d'aval fût exhaussé. Je reproduirai ensuite des expériences de remplissage et de vidange faites depuis, seulement avec six ou sept périodes. Quand on en diminue ainsi le nombre, le rendement est beaucoup moindre. Il dépasse cependant celui qui avait d'abord été trouvé pour six périodes, et qui est mentionné aussi dans le rapport à l'Institut. Cela vient en partie de ce que, voulant voir ce qui arriverait quand on abrégerait autant que possible la durée des manœuvres, on avait levé le tube d'aval, pour chacune des six périodes de vidange, aussitôt après la cessation du versement au sommet. De sorte qu'on perdait tout le volume d'eau qui rentre pour la manœuvre ordinaire dans l'écluse, en vertu des oscillations en retour. La durée de chaque oscillation en retour était à peu près de douze secondes; mais, en supprimant cette perte de temps, il fallait tenir compte de ce que la descente des deux colonnes liquides par le tube d'aval n'était pas tout à fait instantanée, et de ce que la percussion de cette eau s'opposait plus ou moins à la sortie de celle de l'écluse.

Je ne me dissimule pas que la méthode dont il s'agit laisse,

comme je l'ai dit, quelque incertitude. On en jugera par les détalls que je vais donner sur la manière dont se combinent les effets observés et les compensations qui en résultent. On pourra ensuite coordonner les résultats obtenus avec ceux qui l'avaient été plus directement dans les expériences précitées déjà décrites dans deux rapports faits sur le système au ministère des travaux publics. Quant aux expériences faites à Saint-Lô sur un appareil provisoire, dont le tuyau de conduite en zinc était beaucoup trop court et n'avait pour objet que la vidange de l'écluse, le rendement était à peu près le même qu'à Chaillot, mais à cause des dimensions de ce tuyau on employait plus de périodes.

Pour se rendre compte des résultats de *l'épargne*, il faut comprendre en quoi elle diffère du *rendement* proprement dit de l'appareil à élever l'eau. Je suppose que toute l'éclusée fût à la hauteur de son centre de gravité et que la machine donnât un rendement de soixante pour cent en eau élevée. Trois huitièmes de l'éclusée seraient relevés au bief supérieur; cinq huitièmes tomberaient au bief d'aval pendant la vidange. Trois huitièmes seraient retirés du bief inférieur, et cinq huitièmes descendraient du bief supérieur pendant le remplissage. En définitive, il ne serait sorti qu'un quart de l'éclusée du bief d'amont. On trouve de même qu'on épargnerait encore les deux tiers de l'éclusée, si l'appareil n'avait qu'un rendement de cinquante pour cent en eau élevée. On voit d'après cela qu'il n'y a rien d'étonnant dans les résultats obtenus pour *l'épargne* de l'eau.

Voici quelques détails sur les précautions à prendre pour mesurer le rendement sur une écluse quelconque, sans avoir besoin d'un bassin de jaugeage. Il faut d'abord qu'il y ait dans le sas un bateau chargé ayant les plus grandes dimensions possibles. Des observateurs sont sur ce bateau à chacune de ses extrémités avec des perches graduées. S'il s'agit de remplir l'écluse, à la première période on lève le tube

d'amont. L'eau du bief supérieur commence par remplir les deux tubes verticaux. La longue colonne liquide du tuyau de conduite résistant par son inertie, la quantité d'eau dont je viens de parler ne paraît pas d'abord dans l'écluse, et il en sort même une *bouffée* au sommet du tube d'aval. Les observateurs précités notent la hauteur obtenue à chaque perche, non seulement jusqu'à l'instant où le tube d'amont retombe sur son siège, mais jusqu'à celui, d'ailleurs très peu différent, où le tube d'aval se lève. Ainsi la quantité d'eau, qui avait rempli les tubes verticaux et qui n'avait pas encore paru dans l'écluse, finit par y entrer, sauf une petite fraction qui peut tomber au bief inférieur, étant restée dans ces tubes au moment où celui d'aval se lève. A partir de cet instant, les observateurs notent, sur chaque perche, la hauteur à laquelle l'eau monte du bief inférieur dans le sas, jusqu'au moment où l'on baisse le bief d'aval. Il redescend ensuite de l'écluse dans les tubes verticaux de l'eau résultant de l'oscillation en retour, et dont on tient compte.

On voit que pour le remplissage de l'écluse, si l'on prend des moyennes à l'aide des perches, cette méthode est satisfaisante, surtout quand on fait, au besoin, plusieurs expériences successives. Chaque période de la machine donne un résultat, et la marche des effets peut même être assez régulièrement suivie. Mais il est juste de tenir compte de ce que l'eau, qui entre encore dans l'écluse avant que le tube d'aval se lève, n'est entièrement tirée du bief supérieur que pour la première période. De sorte qu'on se tromperait au désavantage de la machine, si l'on regardait comme tirée de ce bief la colonne liquide, remontée dans les tubes pendant l'oscillation en retour, et qui rentre dans l'écluse avant qu'il vienne de l'eau du bief d'aval.

La mesure du rendement pendant la vidange de l'écluse se fait aussi dans les mêmes circonstances par un moyen semblable. On détermine à chaque période la quantité d'eau descendue au bief inférieur et celle qui est relevée au bief

d'amont. Mais quelques explications sont nécessaires à cause des diverses manières dont les tubes mobiles se vident alternativement.

Quand on vide l'écluse, on laisse retomber à chaque période ce qui reste de liquide dans les deux tubes verticaux après l'oscillation en retour. Pour la première période on perd le volume d'eau compris entre les niveaux des deux biefs. Pour les dernières, l'eau contenue dans ces tubes rentre entièrement dans le sas, et même, en vertu de la vitesse acquise, on peut en tirer une certaine quantité du bief inférieur. Je suppose qu'en moyenne on laisse ainsi tomber dans ce bief à chaque période un volume d'eau égal à la moitié environ de celui qu'on y a laissé tomber dans la première. Il semble d'abord qu'on doit ajouter à la quantité d'eau descendue de l'écluse un volume égal à cette moitié multipliée par le nombre des périodes.

Mais il faut tenir compter de ce que, pendant la levée du tube d'aval, des colonnes liquides s'étaient élevées graduellement dans les deux tubes verticaux au-dessus du niveau du bief inférieur, en vertu de la percussion de l'eau sortant sous le tube d'aval. Celle de ce dernier tube est frappée immédiatement en-dessous par la nappe d'eau annulaire. Il faut même avoir égard à ce que, pendant la baisse du tube d'aval, il y a un étranglement graduel d'où résulte une action encore plus forte contre cette colonne. La grande masse d'eau du long tuyau de conduite persiste dans son mouvement, et il y aurait un coup de bélier, d'ailleurs, contre une petite masse liquide, si la baisse du tube était instantanée.

L'expérience a appris que le coup de bélier quelconque, qui semblait pouvoir résulter de cet étranglement, d'ailleurs d'autant plus graduel que la levée est plus grande, n'occasionne aucun inconvénient, n'agissant que sur une masse liquide, et très petite par rapport à celle qui la presse de cette manière. Mais, à cause de ces divers effets, quand on entend le tube tomber sur son siège, les deux colonnes li-

quides verticales précitées sont parvenues à des hauteurs notables. De sorte qu'il y a une compensation dans la manière d'apprécier les quantités d'eau descendues, puisque, à l'époque où l'on entend le tube d'aval retomber sur son siège, on avait tenu compte, comme passée au bief inférieur, de toute la quantité formant ces colonnes verticales, tandis qu'elles n'étaient réellement pas sorties du système.

Il y a une remarque semblable à faire pour apprécier la quantité d'eau relevée au bief d'amont. Il paraît, en effet, au premier aperçu, qu'on devrait retrancher du volume d'eau relevé, un volume égal à celui qui est compris entre les sommets des tubes et ceux des colonnes verticales, qui y étaient ainsi soutenues au-dessus du niveau du bief inférieur, quand on a entendu tomber le tube d'aval sur son siège. Mais il faut tenir compte d'une compensation résultant de ce que, pendant les oscillations en retour, il est rentré dans l'écluse, à chaque période, un volume d'eau qui diminue celui qu'on aurait sans cela noté comme relevé au bief supérieur, depuis l'instant où l'on a entendu le tube d'aval retomber sur son siège.

On voit qu'il y a des causes de compensation dans la manière de mesurer le rendement au moyen de la baisse du niveau dans le sas à chaque période. Il est aussi à remarquer que les anomalies peuvent se compenser, et qu'il en résulte même, quand on considère le rendement signalé par *l'ensemble des périodes*, que des expériences, qui semblent au premier aperçu, devoir différer à cause de quelques détails, conduisent en définitive à des sommes dont les différences sont insignifiantes. Cette remarque s'applique à des séries d'expériences faites à des époques même très éloignées les unes des autres, toutes choses sensiblement égales d'ailleurs. Elle est applicable, soit aux expériences sur la vidange de l'écluse, soit à celles de remplissage. Mais la marche des résultats des périodes successives ne pourrait se voir complètement que si, à chacune d'elles, on tenait compte

de l'influence des oscillations en retour. Pendant le remplissage du sas, la quantité d'eau tirée du bief d'aval est plus grande qu'elle peut ne le paraître, celle qui rentre dans les tubes ne sortant pas du système.

Dans ce qui précède relativement à cette méthode, j'ai supposé que les observateurs étaient aidés au besoin par le bruit que les tubes font entendre en touchant leurs sièges. Il pourrait donc être utile, pour ce cas seulement, de ne pas se servir des freins hydrauliques au moyen desquels on amortit les percussions des tubes sur leurs sièges. Mais ces percussions faisant rebondir les tubes sont une cause de déchet et il vaut mieux faire diriger les expériences par un observateur exercé. Elles l'ont été par M. Perrault, à une époque où d'ailleurs les nouveaux freins hydrauliques, installés aujourd'hui à l'écluse de l'Aubois, n'étaient pas inventés et, comme je viens de le dire, cela devait diminuer un peu le rendement.

Les détails précédents me paraissent utiles pour fixer les idées sur ce mode d'expérience proposé par l'administration du canal. Je ne saurais trop insister d'ailleurs sur l'utilité d'employer les plus *grands bateaux chargés* pour ce genre d'observations. S'il n'y avait pas du tout de bateau dans l'écluse, les mesures prises ainsi ne conduiraient à aucun rendement sérieux.

Voici le tableau d'expériences de remplissage pour deux chutes, la première de 2^{m}44, la seconde de 2^m,43, reproduit par M. Vallès dans son dernier rapport. Les petites irrégularités se compensent assez pour disparaître sensiblement dans les *sommes totales* relatives à chacune de ces expériences. M. Vallès recommande de baisser le tube d'aval quand le calme qui s'établit au fond de ce tube indique la cessation de la rentrée de l'eau dans le sas. Le rendement aurait été plus fort si l'on avait attendu un peu afin de mieux profiter pour les premières périodes des oscillations remontantes.

NUMÉROS des PÉRIODES.	PREMIÈRE EXPÉRIENCE hauteurs successives des tranches d'eau venant		DEUXIÈME EXPÉRIENCE hauteurs successives des tranches d'eau venant	
	de l'amont.	de l'aval.	de l'amont.	de l'aval.
1	0m.035	0m.200	0m.035	0m.230
2	0m.040	0m.185	0m.040	0m.175
3	0m.040	0m.165	0m.040	0m.170
4	0m.050	0m.160	0m.040	0m.130
5	0m.050	0m.075	0m.050	0m.075
6	0m.065	0m.070	0m.060	0m.070
7	0m.095	0m.070	0m.065	0m.055
8	0m.095	0m.050	0m.090	0m.050
9	0m.125.	0m.030	0m.170	0m.045
TOTAUX.	0m.595	1m.005	0m.590	1m.000

On voit que les résultats de ces expériences s'accordent assez bien. S'il y a quelques chances d'erreurs que j'ai signalées ci-dessus, il faut tenir compte de ce que, à l'écluse de l'Aubois, l'orifice de communication entre la chambre du tube d'aval et la rigole de décharge, n'étant pas assez large, comme je l'ai expliqué plus haut, l'eau baissait à chaque aspiration autour de ce tuyau. De sorte qu'elle était puisée à un niveau plus bas que si ce passage avait été plus grand. Dans beaucoup d'expériences cette baisse a été d'une dizaine de centimètres.

Quant aux expériences de vidange, les résultats étaient beaucoup mieux connus, à cause des expériences antérieures. En 1873, pour une chute d'environ 2m,40, les portes étant fermées et les tubes baissés, le sas étant plein, le niveau a baissé de om,145 en 10 minutes et de 0m,132 dans les 10 minutes suivantes. Il a fini par descendre jusqu'à 0m,8 environ au-dessus du niveau d'aval et il est resté stationnaire.

Expériences faites sans bassin d'épargne, le nombre de périodes n'étant que de 6 ou 7.

REMPLISSAGE.

NUMÉROS des PÉRIODES.	PREMIÈRE EXPÉRIENCE hauteurs successives des tranches d'eau venant		DEUXIÈME EXPÉRIENCE hauteurs successives des tranches d'eau venant	
	de l'amont.	de l'aval.	de l'amont.	de l'aval.
1	$0^{m}.015$	$0^{m}.270$	$0^{m}.020$	$0^{m}.275$
2	$0^{m}.035$	$0^{m}.185$	$0^{m}.035$	$0^{m}.180$
3	$0^{m}.050$	$0^{m}.135$	$0^{m}.050$	$0^{m}.130$
4	$0^{m}.090$	$0^{m}.110$	$0^{m}.075$	$0^{m}.150$
5	$0^{m}.140$	$0^{m}.045$	$0^{m}.115$	$0^{m}.055$
6	$0^{m}.220$	$0^{m}.015$	$0^{m}.155$	$0^{m}.035$
			$0^{m}.210$	$0^{m}.015$
TOTAUX.	$0^{m}.550$	$0^{m}.760$	$0^{m}.660$	$0^{m}.840$

VIDANGE.

NUMÉROS des PÉRIODES.	PREMIÈRE EXPÉRIENCE		DEUXIÈME EXPÉRIENCE	
	eau passant à l'aval.	eau passant à l'amont.	eau passant à l'aval.	eau passant à l'amont.
1	$0^{m}.030$	$0^{m}.170$	$0^{m}.020$	$0^{m}.165$
2	$0^{m}.065$	$0^{m}.140$	$0^{m}.030$	$0^{m}.130$
3	$0^{m}.090$	$0^{m}.090$	$0^{m}.070$	$0^{m}.135$
4	$0^{m}.110$	$0^{m}.065$	$0^{m}.090$	$0^{m}.090$
5	$0^{m}.150$	$0^{m}.085$	$0^{m}.115$	$0^{m}.030$
6	$0^{m}.170$	$0^{m}.035$	$0^{m}.170$	$0^{m}.020$
7	$0^{m}.215$	$0^{m}.025$	$0^{m}.205$	$0^{m}.035$
TOTAUX.	$0^{m}.830$	$0^{m}.610$	$0^{m}.700$	$0^{m}.605$

Je me borne à donner le tableau des expériences faites dans ces conditions en 1874 par M. Perrault. Celles qu'il avait faites l'année précédente avec les mêmes nombres de périodes ont conduit à des résultats sensiblement identiques, quant aux sommes des tranches d'eau tirées du bief d'aval ou relevées au bief d'amont, quoique les périodes successives n'eussent pas été égales pour des conditions d'ailleurs les mêmes. Cela confirme ce que j'ai déjà dit sur les compensations, d'où il résulte que les anomalies disparaissent, en général, pour ce genre d'observations, lorsqu'on ne considère que la *somme* des quantités d'eau épargnées, ce qui est, en définitive, l'essentiel pour la pratique. En 1873, pendant le remplissage, la somme des épaisseurs des tranches d'eau tirées du bief inférieur pour 6 périodes a été de $0^m,76$ et pour 7 périodes de $0^m,845$. Quant à la vidange, le nombre de périodes étant de 7, la somme des épaisseurs des tranches d'eau relevées au bief supérieur a été comme en 1874, successivement de $0^m,61$ et de $0^m,605$.

Pour se rendre compte de quelques uns des effets qui se présentent dans les expériences de ce genre, il ne faut pas oublier, comme je l'ai expliqué ci-dessus, qu'en supposant même qu'il ne sortît pas d'eau du sas avant l'instant où le tube d'aval retombe sur son siège à l'époque de la vidange, il se développerait ensuite une quantité considérable de force vive, à cause de la descente de l'eau qui doit remplir les deux tubes verticaux.

Quand on a fait ces deux séries d'expériences, le tube d'aval était, ainsi que je l'ai dit, exhaussé de $0^m,30$. Mais comme cela n'avait aucune influence sur l'épargne pendant le remplissage, on voit combien il est utile de ne pas diminuer sans nécessité le nombre des périodes (1).

(1) Cela résulte aussi d'une série d'expériences de M. de Marne. Elles ne sont pas aussi régulières que celles qui ont été faites avec de très grands bateaux chargés. Mais lorsque le nombre des périodes était de dix à onze, le résultat moyen était une épargne totale

Considérations sur les mouvements de l'eau dans les premières périodes.

La quantité de travail perdu en résistances passives augmente bien plus rapidement que la quantité d'eau descendue à chaque période, soit de l'écluse au bief inférieur, soit du bief d'amont dans le sas. On peut s'en rendre compte d'une manière approximative en cherchant quel serait le travail nécessaire pour conserver les vitesses de l'eau, comme s'il n'y avait pas de résistances passives supposées d'ailleurs proportionnelles à leurs carrés. Considérons, par exemple, la colonne liquide depuis l'instant où elle verse aux sommets des tubes par hypothèse à une même hauteur. La force vive, abstraction faite des résistances passives, serait proportionnelle au travail employé pour la produire, si les niveaux

de 0,749 de l'éclusée, tandis que, si l'on avait pris l'ensemble des expériences faites en partie avec neuf périodes, on n'aurait trouvé qu'une épargne de deux tiers environ de l'éclusée. Ces résultats de quatre expériences de remplissage et de quatre de vidange, dont la moitié avait été faite seulement avec neuf périodes, sans avoir la régularité de celles qui ont été l'objet du rapport à l'Institut, offrent un certain intérêt, à cause de cette marche des effets, et de la manière dont cela se coordonne avec les expériences précédentes et celles qui ont été faites longtemps après, avec les plus grands bateaux chargés remplissant presque entièrement l'écluse. La chute était de $2^m,40$.

M. de Marne dit d'ailleurs lui-même dans sa lettre du 19 février 1869 : «... On ne retrouve pas toujours dans ces détails la régularité « que la théorie indique, mais il faut remarquer que les opérations « ont été faites avec des petits bateaux du Berry, qui n'ont que 2^m50 de « largeur et dont les oscillations sont plus grandes que celles des « grands bateaux du canal latéral. Ce sont ces oscillations de roulis et « de tangage qui rendent les mesures souvent difficiles à prendre et le « plus souvent irrégulières. Ces oscillations sont quelquefois assez fortes « pour que la dernière marque faite à la perche soit indiquée sur la « partie de perche déjà marquée antérieurement... »

M. Perrault, qui assistait avec M. de Marne à ces expériences, m'a dit qu'on n'avait pas noté celles pour lesquelles le défaut dont on vient de parler s'était manifesté. Il m'a paru intéressant de mentionner

étaient supposés constants. Le chemin parcouru serait proportionnel à la même quantité. Le travail en résistances passives serait donc proportionnel au carré de cette dernière.

Dans la réalité il n'en est pas ainsi, par la raison même que les résistances passives diminuent les vitesses. Mais ce que je viens de dire suffit pour montrer avec quelle rapidité augmente le rapport du travail en résistances passives à celui de l'eau quand on augmente, pour une période donnée, la quantité d'eau descendue. Cela explique le paradoxe, qui peut sembler résulter au premier aperçu, de ce que j'ai dit des effets observés quand on change considérablement le volume d'eau descendu pour une période donnée.

J'ai indiqué ci-dessus comment, en tournant une difficulté, il est possible de se rendre compte du nombre des périodes de la machine qui conduit au rendement maximum, lorsqu'on sait d'ailleurs par expérience qu'elles ne doivent pas être trop peu nombreuses si le temps n'est pas limité. Pour éviter tout malentendu, je dois avertir que, si l'on considérait séparément chaque période, les principes sur lesquels repose

succinctement une série d'expériences qui, malgré leur irrégularité, résultant des mauvaises conditions dans lesquelles elles avaient été faites, confirme cependant la marche générale des effets obtenus avec les plus grands bateaux chargés.

Pour avoir des moyens de contrôle, on a fait quelques observations secondaires en employant des mesures dites *cubiques* moins délicates à prendre que celles des épaisseurs des tranches successives. Le bassin d'épargne, avant d'être retréci comme il l'est maintenant, permettait de produire quelques périodes de remplissage ou de vidange, sans que les variations du niveau dans ce bassin fussent assez grandes pour empêcher d'apprécier les effets des chutes moyennes. Mais elles l'étaient assez pour qu'on pût prendre les mesures des quantités d'eau descendues dans ce bassin pendant la vidange de l'écluse ou qui en étaient retirées pendant le remplissage. Les rendements ainsi obtenus ne sont pas en désaccord avec ceux qui avaient été obtenus par d'autres moyens.

On a fait aussi quelques essais en se servant des variations du niveau dans le bief très court qui est en amont de l'écluse de l'Aubois. Je regrette de ne pouvoir en donner les résultats. S'il était possible de les retrouver, ils feraient l'objet d'une note à la fin de ce volume.

la règle générale à laquelle on est conduit, ne seraient pas démontrés pour les premières. Dans ce cas, en effet, quand même il ne descendrait pas d'eau en aval après que les tubes verticaux seraient vidés, il se développerait une quantité notable de force vive en vertu de ce qu'il tombe de l'eau dans les tubes, sans qu'il en sorte alors au bief inférieur pendant la vidange de l'écluse. Si l'on suppose ensuite que le tube d'aval ne redescende pas immédiatement sur son siège, une certaine quantité d'eau viendra de l'écluse au bief inférieur. Le surcroît de perte de travail en résistances passives qui en résultera se composera de trois parties : l'une proviendra des vitesses pendant l'écoulement de l'eau au bief inférieur ; la seconde, de ce que les vitesses seront plus grandes pendant l'ascension de l'eau dans les tubes jusqu'à ce qu'elle se verse à leurs sommets; la troisième résultera de ce que, pendant ce versement, les vitesses seront plus grandes et le chemin parcouru plus considérable. Il est facile de faire quelques calculs numériques au moyen de cette base, en tenant compte des considérations secondaires précitées sur les limites des erreurs qui peuvent en résulter. On est conduit à penser, ce qui semble d'ailleurs s'accorder avec l'expérience, qu'il est convenable de baisser le tube d'aval pour la première période de vidange aussitôt qu'il s'est vidé, et de baisser le tube d'amont pour la première période de remplissage aussitôt qu'il s'est rempli. Quelque rapidement qu'on fasse fonctionner ces tubes, il passe toujours sans doute en général une certaine quantité d'eau au-dessous d'eux, abstraction faite de celle qui les vide ou les remplit.

Mais sans entrer dans des détails de ce genre, il est clair que, si l'on diminue beaucoup le nombre des périodes, il en résulte une diminution notable de rendement, comme on le voit au moyen des tableaux d'expériences. Il est essentiel de remarquer que celles qui ont été faites en 1873 et 1874 sont postérieures à l'exhaussement du tube d'aval. Cela explique pourquoi il y a plus de différence entre le rendement du

remplissage et celui de la vidange que dans les expériences de 1868 et de 1869. L'eau relevée au bief d'amont, entrant aussi dans le tube, exhaussé de 0m,30, sortait en partie à son sommet pendant les premières périodes de vidange, mais elle se versait principalement par celui du tube d'amont. On conçoit que, passant par un seul orifice, l'eau avait de bien plus grandes vitesses qu'à l'époque où les sommets des deux tubes verticaux étaient à la même hauteur. On pouvait même se rendre compte de la résistance provenant de cette cause, en voyant jaillir aussi de l'eau par le sommet du tube exhaussé.

J'ai essayé, en exagérant les quantités d'eau descendues dans une première période, d'étudier les différences qui pourraient résulter de cet exhaussement du tube d'aval, en considérant l'effet tel que je viens de l'expliquer, puis en exhaussant aussi le tube d'amont, de manière à faire verser l'eau à peu près à la même hauteur que par l'autre. Les mesures prises vers la moitié de la longueur de l'écluse par M. Meunier, ne pouvaient pas, comme je l'ai expliqué, être bien concluantes parce qu'il n'y avait pas de bateau dans le sas. Cependant, comme on avait exagéré l'épaisseur des tranches d'eau sorties de l'écluse, afin de diminuer cette incertitude, il est intéressant de remarquer, ainsi qu'on l'a fait pour plusieurs expériences que, s'il y a eu des différences quant aux quantités d'eau relevées au bief supérieur dans ces deux cas, pour une tranche motrice de 0m,10 à 0m,11 descendue de l'écluse au bief d'aval, elles n'ont pas été assez grandes pour être notées. Il en résulte qu'il y a un véritable désavantage à ne faire sortir l'eau relevée au bief supérieur que par le sommet du tube d'amont, de sorte qu'il vaut mieux en général, si l'on a très peu d'eau, faire la dépense d'une voûte pour que l'eau se verse par le sommet des deux tubes. Quant au remplissage de l'écluse, cette disposition est indifférente. On voit encore mieux, d'après cela, pourquoi le rendement, dans les dernières expériences, est beaucoup plus fort pour le remplissage que pour la vidange.

Il y aurait eu un grand intérêt, afin d'accélérer le service et surtout pour obtenir une marche automatique, à ce que les premières périodes eussent pu débiter beaucoup plus d'eau que dans la marche normale. J'ai déjà dit qu'au delà d'une limite assez restreinte on n'augmentait pas la quantité relevée au bief supérieur, quand la nappe d'eau descendue de l'écluse était bien plus grande à chaque période. Or, il résulte d'un tableau d'expériences qui vient d'être retrouvé qu'on finissait même par la diminuer.

Quand les résistances passives sont devenues égales à la force accélérative, la vitesse diminue si le niveau continue à descendre dans le sas, et la hauteur à laquelle l'eau doit être relevée augmente. On a exagéré, à cause de l'incertitude du mode d'expérience, les hauteurs auxquelles l'eau devait se relever et les épaisseurs des tranches descendues à chaque période *en ne considérant que la première.*

Pour cinq expériences l'épaisseur de la couche moyenne de l'eau descendue était de $0^{m},216$ et pour cinq autres, de $0^{m},114$. Dans le premier cas, l'épaisseur moyenne de la couche d'eau relevée était de $0^{m},138$. Dans le second, elle a été d'un peu plus de $0^{m},16$. Autant que je peux m'en souvenir, le sommet du tube d'amont était à $0^{m},35$ au-dessus du niveau du bief supérieur et celui du tube d'aval à $0^{m},65$. La hauteur maximum du jet d'eau variable au-dessus du sommet du tube était de $0^{m},45$.

Ces dernières expériences, comme je l'ai expliqué, sans pouvoir donner des résultats exacts, parce qu'il n'y avait pas de bateau dans l'écluse, sont intéressantes pour indiquer la marche des effets. Elles peuvent d'ailleurs servir à faire concevoir combien il est utile de diviser les oscillations en plusieurs, afin de diminuer les vitesses. Car il ne faut pas se faire illusion sur l'emploi des oscillations de trop grandes amplitudes, comme celles au moyen desquelles on voudrait vider ou remplir une écluse ordinaire par une

seule période, si le tuyau de conduite n'avait pas des dimensions excessives (1).

(1) L'idée de transvaser l'eau d'une écluse dans un basin d'épargne et de faire rentrer de l'eau dans le sas au moyen des oscillations dans un grand tuyau de conduite, a été indiquée par M. Josua Field dans les *Transactions of the institution of civil engineers* t. I, publié à Londres en 1836 (pages 61 à 65, planche 12). Il dit avoir fait des expériences sur un petit modèle en 1816. Quoique cette société déclare dans la préface de ce volume qu'elle ne répond pas des assertions émises par les auteurs, j'admets bien volontiers cette dernière date. Cela revient en définitive à considérer les oscillations de l'eau dans un siphon renversé de très grandes dimensions.

Cette publication n'a au reste été faite que plusieurs années après mes premières expériences sur les oscillations de l'eau dans les tuyaux, que j'avais immédiatement communiquées à beaucoup d'ingénieurs, et dont l'illustre Le Verrier parla à plusieurs professeurs de l'Ecole polytechnique. Je suis le premier qui ait trouvé dans quelles limites on doit augmenter la longueur du tuyau de conduite d'une colonne liquide oscillante, pour obtenir le maximum d'effet, et qui ait donné le moyen d'éviter les coups de bélier de ces grandes colonnes liquides, en employant au lieu de soupape, un tuyau mobile, toujours ouvert à ses deux extrémités, de sorte que les sections transversales ne sont jamais bouchées. Sans rappeler ici les phénomènes et les combinaisons que j'ai étudiés, je remarquerai seulement que c'est surtout dans ces deux ordres d'idées que consiste ce qu'il y a de vraiment original dans cette manière de se servir d'un bassin d'épargne avec tuyau de conduite intermédiaire. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que M. Field avait proposé un moyen d'épargner le terrain en enroulant ce tuyau autour d'un bassin d'épargne circulaire, de manière à lui donner ainsi autant de longueur qu'on le voudrait. Cette idée parait de nature à rendre moins dispendieux ce genre de construction.

Il avait prescrit de donner à ce tuyau une capacité au moins égale à celle de l'écluse. Mais ce qu'il dit à ce sujet ne me parait pas admissible, d'autant plus que cela conduirait à des dimensions extrêmement dispendieuses. Le frottement était la cause de déchet, qui le préoccupait surtout, tandis qu'il y en a d'autres en général plus importantes. Il est bien à remarquer que les extrémités de son tuyau n'étaient pas terminées par des ajutages divergents, mais seulement par des embouchures ordinaires très courtes, n'ayant d'autre but que de diminuer la *contraction* de la veine liquide, comme on peut le voir sur sa planche précitée.

Il avait eu aussi l'idée d'appliquer le système d'oscillations aux écluses parallèles dites *jumelles*. Mais, dans tous les cas, il n'a considéré que des capacités de sections égales entre elles aux deux extré-

CONCLUSIONS.

J'ai donné la description des divers moyens d'employer le mouvement acquis des colonnes liquides à épargner l'eau dans les écluses de navigation et à en accélérer le service. Il y a des idées dont il intéressant de conserver la trace, même quand on n'en voit pas l'application immédiate. Mais on demandera sans doute quels sont parmi ces procédés ceux qui me paraissent les plus pratiques.

Je préfère en général ne pas combiner les périodes de l'appareil avec un bassin d'épargne, excepté pour le cas des

mités d'un tuyau de conduite. L'expérience précitée a été faite au moyen de deux vases de section rectangulaire ayant chacun cinq pieds de long et vingt pouces de large. Le tuyau de conduite avait huit pouces de diamètre et quarante-cinq pieds de long. D'après le dessin qu'il a donné pour cette expérience, il n'y avait pas d'embouchure aux extrémités. A l'une d'elles, il y avait un clapet qu'on ouvrait au moyen d'un levier.

La différence des niveaux d'un bassin à l'autre était de douze pouces au moment où l'on a ouvert le clapet. L'eau est montée dans le second bassin de dix pouces et demi. Je n'entre pas dans les détails des expériences qu'il a faites pour des différences de niveaux moindres, parce qu'il ne dit pas comment ses mesures ont été prises, à une époque où l'on ne se préoccupait pas comme aujourd'hui des effets du mouvement des ondes. Mais il m'a paru intéressant de rappeler que, du moins à cette limite, la perte de hauteur n'était pas considérable pour les dimensions, il est vrai, relativement très grandes du tuyau de conduite. J'ajouterai seulement que la colonne liquide étant abandonnée à elle-même depuis cette hauteur de douze pouces à celle d'un pouce, les oscillations ont été isochrones.

M. Field a signalé aussi la possibilité de transvaser alternativement l'eau d'une écluse sans bassin d'épargne en se servant d'un *bélier hydraulique* à soupapes disposées de manière à le rendre successivement aspirateur et élévatoire, mais, dans l'un et l'autre cas, *ne donnant lieu qu'à une seule grande oscillation.* On profiterait ainsi de la force vive de l'eau, quand elle entre dans l'écluse en sortant du bief d'amont, pour relever dans le sas une partie de l'eau du bief inférieur. On profiterait ensuite de la force vive de l'eau, quand elle descend au bief d'aval, à l'époque où l'écluse se vide, pour en relever une partie au bief supérieur. Mais *il déclare que cette disposition ne doit pas, selon lui, être adoptée,*

écluses à sas parallèles dites *jumelles*, parce que, dans des circonstances fréquentes, elles peuvent servir l'une à l'autre de bassin d'épargne, ce qui n'empêche pas que chacune d'elles peut fonctionner d'une manière indépendante.

Quant aux diverses combinaisons qui permettent de se

et que celle sur laquelle il a fait l'expérience précitée lui paraît pratique, ce qui, comme je l'ai dit, me semble difficile à admettre pour les écluses de grandes dimensions, même en employant les tubes mobiles que j'ai proposés.

Ce mémoire de M. Field paraît être oublié, du moins en France. Personne ne me l'ayant indiqué, je n'en ai eu connaissance qu'après avoir compulsé tous les recueils scientifiques français et étrangers que j'ai trouvés dans les bibliothèques de Paris. Je me suis fait un devoir de signaler moi-même ce document. Il ne fait d'ailleurs aucun tort à mes droits de priorité sur ce qu'il y a de plus essentiel dans mes combinaisons relatives aux écluses de navigation. Montgolfier avait construit un bélier en même temps élévatoir et aspirateur. Il avait même signalé un bélier pouvant marcher au moyen de la marée, agissant alternativement dans deux sens opposés. Cependant l'idée de rendre ainsi un bélier alternativement aspirateur et élévatoire me parut intéressante, quand je la trouvai avant de connaître le mémoire de M. Field et je dois rendre justice à ce dernier, tout en remarquant qu'il n'a indiqué dans ce mémoire aucun moyen d'éviter les coups de bélier. Il n'a pas remarqué l'utilité de diviser les oscillations en plusieurs, pour diminuer les résistances passives, et par conséquent il n'a pas étudié les combinaisons nécessaires pour que cette division puisse être exécutée d'une manière pratique, et sans aucun inconvénient.

Il faut ajouter que, pour cette forme d'un bélier hydraulique à une seule oscillation, M. Field n'a pas proposé de faire déboucher le tuyau de conduite dans l'écluse par une des enclaves des portes d'aval, comme cela a été fait à l'écluse de l'Aubois, mais, à une distance de cette enclave à peu près égale à la moitié de la longueur de celle-ci. Je dois convenir que M. Maus a fait déboucher un aqueduc à une place analogue, à l'écluse d'Herbières. De sorte qu'il n'était pas nécessaire qu'il connût la disposition que j'avais dessinée, pour faire la jolie expérience sur l'ouverture spontannée des portes d'amont, dont j'ai rendu compte ci-dessus avant d'avoir retrouvé le mémoire de M. Field. Ce dernier, d'après ses dessins, avait proposé, pour le bassin d'épargne, de faire déboucher le tuyau de conduite dans l'écluse à une distance des portes d'amont analogue à celle que, pour la disposition précédente, il avait proposée relativement aux portes d'aval; et pour les écluses *jumelles* de le faire déboucher au milieu de la longueur de chaque sas.

Je vais ajouter quelques détails aux renseignements historiques

passer des périodes de l'appareil pour vider et remplir alternativement une écluse, au moyen de grandes oscillations dans des bassins d'épargne, il ne me paraît bien utile de les étudier que pour les écluses de *petite navigation.* J'ai cependant examiné leurs avantages et leurs inconvénients. Mais j'ai signalé des causes de perte de force vive résultant de la difficulté de donner aux tuyaux de conduite de trop grandes sections, et j'ai insisté sur ce qu'il est convenable de diviser les oscillations en plusieurs, afin de diminuer les vitesses aux carrés desquelles la plupart des causes de déchet sont proportionnelles. Dans ces dernières années, plusieurs ingénieurs, croyant perfectionner mon travail en proposant une seule grande oscillation, sont revenus, sans le savoir, sur des idées que j'avais publiées depuis longtemps.

mentionnés dans le rapport à l'Institut sur les caissons de diverses espèces, quoique les appareils, objets de mes études spéciales sur les écluses de navigation, permettent de s'en passer. Je rappellerai seulement que le colonel Congrève, dans un mémoire in-4°, publié en 1814 et 1815, sur son écluse à flotteur, signale les avantages pour deux écluses dites accolées, de ce que les niveaux peuvent se rapprocher par des mouvements en sens contraire, si l'on emploie des moyens de ce genre, l'eau baissant dans celle d'amont en même temps qu'elle monte dans celle d'aval.

Brian Donkin a fait pour deux écluses accolées une remarque analogue sur l'écluse à flotteur et à triple compartiment de Bogaerts (London, *Journal of arts and sciences* t. I, 1820). Il en résulte une simplification intéressante pour mes appareils à cause de simultanéité du mouvement des niveaux dans les écluses accolées.

Parmi les nombreux systèmes proposés pour épargner l'eau dans les écluses, on peut rappeler encore celui pour lequel Logan a pris une patente en 1804 (*Reportory of arts* 1re série), à cause de l'emploi du système de détente des masses liquides. Un gros piston serait alternativement refoulé horizontalement par l'eau d'un sas dont la pression à détente variable serait convenablement équilibrée dans toutes les positions, au moyen d'un contrepoids dont la chaîne passerait sur une sorte de roue spirale. Steevens a publié un mémoire sur le même sujet dans le tome XXIII, 2e série du même Recueil. On remarque dans ce dernier l'idée plus générale d'employer le principe de la détente dans un canal non recouvert, le piston se réduisant à une sorte de barrage mobile dans le sens horizontal (*And may be used in open as well as close piston-ways*, p. 149, 1813).

Leurs calculs ont d'ailleurs confirmé d'une manière intéressante des formules que j'avais présentées à l'Académie des Sciences, comme on peut le voir dans les *Comptes rendus*.

Ne parlant dans ces conclusions que ce qui a été exécuté sur une grande échelle, je rappellerai seulement qu'on a particulièrement remarqué la manœuvre pour laquelle les deux tubes mobiles sont conduits l'un par l'autre. Comme on n'aurait alors besoin que d'un seul balancier, il serait facile d'obtenir une marche entièrement automatique au moyen d'un jeu de cataractes.

Pour les manœuvres de ce genre, l'eau relevée au bief supérieur passant sous le tube d'amont, ce bief pourrait avoir des variations de niveau très considérables sans que cette eau se versât plus haut que cela ne serait utile. Mais cette manœuvre ne serait point applicable aux combinaisons des périodes de l'appareil, soit avec un bassin d'épargne, soit avec une écluse *jumelle*.

On croyait que tout système d'épargne de l'eau dans les écluses de navigation devait ralentir le service. Je montre au contraire qu'un nouvel appareil peut servir à l'accélérer, tout en permettant d'économiser l'eau, mais qu'on pourrait même l'employer ainsi utilement, si les eaux étaient abondantes. Il est d'atlleurs à remarquer qu'avec ce système les écluses, sans dépenser plus d'eau, auront, si l'on veut, des chutes beaucoup plus grandes. De sorte qu'un bateau sera bien moins longtemps à traverser un canal, lorsqu'on aura diminué considérablement le nombre des écluses.

M. Vallès a rendu un compte très favorable, dans son dernier rapport, de la facilité et de la sûreté des nouvelles manœuvres exécutées en sa présence à l'écluse de l'Aubois. Il recommande spécialement à divers points de vue, quand ce ne serait que pour accélérer le service, de substituer aux ventelles, les grands tubes mobiles que j'ai proposés et qui ont d'ailleurs l'avantage de ne pas être engorgés par les herbes. Mais je dois appeler l'attention sur une note additionnelle

qu'il a jointe à son rapport, parce que, d'après la manière dont un passage de ses conclusions était rédigé, il pouvait y avoir un malentendu qui aurait fait croire le rendement de la machine, quand on ne se sert pas d'un bassin d'épargne, moitié moindre qu'il n'avait voulu le dire (1).

(1) Le passage dont il s'agit avait, en effet, été d'abord interprété de cette manière par un ingénieur des ponts-et-chaussées. S'en étant ensuite aperçu, il a fait une rectification à un mémoire qu'il a publié sur ce sujet. On m'a conseillé, à cette occasion, de reproduire sans aucun commentaire l'extrait suivant d'une lettre adressée à M. Vallès, qui a eu la bonté de le publier dans sa note additionnelle, et dans lequel je ne fais que rappeler la manière dont la question a été présentée, même dans le rapport à l'Institut reproduit plus haut.

« Monsieur, vous avez bien voulu me communiquer les conclusions « de votre dernier rapport sur mon système d'ecluses de navigation. « Je me suis aperçu que, dans l'hypothèse où l'on supprimerait le « bassin d'épargne, pour ne compter que sur le jeu des périodes de la « machine, vous n'aviez tenu compte que d'une seule des opérations, « soit de remplissage, soit de vidange; en un mot, que vous supposiez « que, si la machine marchait pendant la vidange, elle ne marcherait « pas pendant le remplissage, ou que, si elle marchait pendant le rem- « plissage, elle ne marcherait pas pendant la vidange.

« Il peut être intéressant de considérer la machine à ce point de « vue, mais les personnes qui n'auraient pas sous les yeux vos rap- « ports précédents pourraient croire le rendement moitié moindre « qu'il ne l'est en réalité quand on fait les deux opérations. Pour « éviter tout malentendu, je crois qu'il est utile de rappeler que vous « avez dit, dans votre rapport de 1868, que, lorsqu'on remplit une « écluse au moyen des périodes de la marchine, on retire du bief « d'aval environ 40 pour 100 de l'éclusée, de sorte qu'on prend 60 « pour 100 du bief d'amont; mais de ces 60 pour 100, quand on vide « l'ecluse, on relève environ 40 au bief d'amont, de sorte qu'en défini- « tive il ne descend que 20 pour 100 de l'éclusée au bief d'aval. »

Note pour le tirage à part. — Formule approximative du siphon renversé des p. 20, etc. et 149 de la 1re partie. La profondeur du point de départ au-dessous du niveau de l'eau tranquille étant 1 et le chemin parcouru dans le long tuyau horizontal d'un diamètre D étant C jusqu'à ce que ce niveau soit atteint, le rapport de la hauteur obtenue au-dessus du même niveau à cette profondeur dans une des branches verticales, F étant un coefficient relatif à la somme des résistances passives, est le rapport de 1 à $\frac{C}{D} F + 1$.

DESCRIPTION

DE

PLUSIEURS APPAREILS NOUVEAUX POUR LES ÉPUISEMENTS

Expériences diverses sur ces Systèmes

Quand une colonne liquide oscillante descend alternativement au-dessous du niveau de l'eau à épuiser, si une soupape laisse entrer cette dernière sans lui permettre de retourner dans le puits d'où elle est sortie, elle se joint à celle qui est en oscillation. Une machine qui semble, au premier aperçu, n'être destinée qu'à élever l'eau au-dessus du niveau du bief supérieur, peut, ainsi, être transformée en appareil pour les épuisements. On en verra plusieurs exemples dans la suite de cet ouvrage. J'en dis ici quelques mots seulement pour montrer comment j'ai été conduit à l'idée de tirer un liquide de toutes les profondeurs au moyen d'une chute d'eau.

En 1834, j'inventai un moyen de produire, avec une chute motrice d'une hauteur donnée, des oscillations d'une amplitude *indéfinie*, et c'est un des principes pour lesquels l'Académie des sciences m'a fait l'honneur de me décerner le prix de mécanique en 1839. Je montrai, d'ailleurs, dans le Mémoire présenté à l'Institut en 1837, qu'on pouvait aussi, en vertu du principe dont je viens de parler, tirer de l'eau d'une profondeur quelconque *en théorie*, c'est-à-dire en supposant que l'appareil put avoir d'assez grandes dimensions pour

que les oscillations, malgré les résistances passives, descendissent assez bas.

La première idée qui se présentait après celle d'enfoncer à une grande profondeur l'origine des oscillations était de disposer à cette profondeur la soupape d'arrêt d'un bélier aspirateur de Montgolfier plus ou moins modifié. Mais, par la raison même qu'elle était une conséquence de la première, quoique je la retrouve dans des feuilles que j'ai écrites depuis longtemps, j'y avais fait d'abord, je l'avoue, peu d'attention, le système précité, remarqué par l'Institut, me paraissant beaucoup plus intéressant au point de vue de la science. De sorte que j'ai indiqué officiellement pour la première fois l'idée de tirer l'eau d'une profondeur quelconque au moyen de l'aspiration résultant de la vitesse acquise d'une colonne d'eau partant d'assez bas, dans un travail présenté à l'Académie des sciences le 12 octobre 1857 et dont un extrait seulement est imprimé dans *les Comptes rendus,* le manuscrit étant, d'ailleurs, resté au secrétariat.

J'ai publié ce principe dans d'autres écrits cités par M. Chemin. Le Mémoire de ce savant ingénieur, que je vais d'abord reproduire a été inséré dans *les Annales des ponts et chaussées* en 1879, et en 1880 dans *la Revue universelle* de M. de Cuyper. Depuis qu'il est publié, M. Chemin a construit cet appareil en employant un tuyau d'aspiration de $0^m,3$ de diamètre, ce qui augmente encore l'utilité de ses expériences. J'attache aujourd'hui autant d'importance aux idées *immédiatement applicables dans beaucoup de circonstances,* qu'à celles dont l'originalité plus tranchée paraît appelée à avoir, dans l'avenir, des applications peut-être plus intéressantes. C'est à M. Chemin qu'appartient l'honneur d'avoir réalisé ce nouveau bélier aspirateur, après m'avoir consulté sur divers détails On sait combien il y a de recherches délicates à faire pour construire une machine nouvelle, même avec les conseils de l'inventeur, et j'espère qu'on appréciera toute l'étendue du service qu'il a rendu ainsi à la science et à l'industrie. Il me paraît,

d'ailleurs, utile de présenter ce Mémoire à la suite de mon travail sur les écluses. Il fixera mieux, peut-être, les idées sur la manière dont les choses pourraient être modifiées, si l'on ne craignait pas d'employer une ou plusieurs soupapes pour introduire alternativement de l'eau du bief inférieur dans le sas au lieu de se servir pour cela d'un tube mobile, qu'il n'est pas aussi facile de rendre automatique pendant le remplissage de l'écluse, tandis que ces soupapes fonctionnent toujours d'elles-mêmes. Mon système d'écluses avait, d'ailleurs, constaté sur une très grande échelle, qu'on pouvait se passer, pour un bélier aspirateur, du réservoir d'air dilaté proposé par Montgolfier.

« *Mémoire sur un* **Nouveau bélier aspirateur** de M. de Caligny *pouvant tirer l'eau de toutes les profondeurs, par* M. O. Chemin, *ingénieur des ponts et chaussées.*

« **Exposé.** — La machine dont il va être question a pour but de permettre de faire d'une manière facile, économique et surtout automatique, les épuisements dans des conditions déterminées, en employant l'eau comme force motrice. Son principe repose sur l'idée déjà bien ancienne d'utiliser la force vive d'une colonne liquide mise en mouvement dans un tuyau.

« Imaginons que l'eau venant d'une source située à un niveau supérieur s'écoule par un tuyau d'une certaine longueur et prenne dans ce tuyau une vitesse fonction de la hauteur de chute. Si, à un certain moment, nous interrompons la communication avec l'eau supérieure, nous aurons dans le tuyau une sorte de piston liquide, animé de la vitesse dont on vient de parler, qui tendra à continuer son mouvement et dont la force vive est susceptible d'être transformée en travail mécanique utile, si on sait l'employer d'une manière convenable.

Le bélier hydraulique élévatoire est une des premières tentatives, couronnées de succès, que l'on ait faites pour utiliser la force vive de l'eau dans ces conditions. On sait toutefois que pour ces machines, même avec les perfectionnements qu'elles ont reçus dans

ces derniers temps, il ne faut guère compter sur un rendement de plus de 50 p. 100.

« C'est seulement en 1847-48, que nous voyons utiliser pour la première fois la force vive de l'eau pour faire les épuisements. Un remarquable mémoire de M. l'ingénieur en chef Leblanc (1) fait connaître les moyens qu'il a employés pour réaliser cette idée. Nous indiquerons plus loin les différences essentielles et bien tranchées qui distinguent son bélier de la machine que nous allons décrire.

« Dans les nombreux et intéressants mémoires qu'il a publiés sur les divers points de l'hydraulique, M. le marquis de Caligny, Correspondant de l'Institut, a indiqué d'autres moyens de tirer parti de cette force. Il croit être le premier qui ait employé les phénomènes de succion pour faire fermer alternativement les soupapes analogues à celles dites d'*arrêt* du bélier élévatoire. Il paraît que Montgolfier et ses successeurs ne comptaient pour cela que sur la percussion de l'eau. Les phénomènes de succion étudiés et employés par M. de Caligny pour faire fonctionner les soupapes annulaires ou autres de plusieurs de ses moteurs hydrauliques ont changé l'état de la question, et permis aux ingénieurs qui se sont occupés du bélier hydraulique de profiter de ses découvertes. C'est dans la lecture de ses travaux que nous avons trouvé ce qu'il y a d'essentiel dans l'idée de la machine actuelle, comme nous l'expliquerons plus loin (voir le compte rendu des séances de l'Académie des sciences du 12 octobre 1857, l'année 1866 du journal de mathématiques de M. Liouville, et le Bulletin de la Société philomathique du 3 mai 1866). C'est grâce à ses savants conseils et à son expérience, que nous avons pu surmonter les quelques petites difficultés que nous avons rencontrées, et arriver aux résultats dont nous allons rendre compte.

« **Description.** — La machine figurée dans le dessin ci-joint (pl. VII, fig. 1) se compose de trois parties :

« La première est une caisse longue ou tuyau vertical A d'assez grande section transversale, amenant l'eau motrice.

« La seconde V, qu'on pourrait appeler l'appareil de distribution, est une autre caisse prismatique de petite dimension, percée de trois orifices et qui s'adapte à la partie inférieure de la caisse A, de manière à devenir solidaire avec elle.

« La troisième est le tuyau évacuateur O, dans lequel se mouvra

(1) « Actuellement inspecteur général.

à un moment donné la colonne liquide dont il s'agit d'utiliser la force vive.

« La caisse A est en bois. Elle a la forme d'un prisme rectangulaire. Elle est surmontée d'une partie de plus large section, formant une sorte de bâche ou réservoir B, où l'on fait arriver, par un moyen quelconque, l'eau de la source dont on dispose. Une de ses parois est disposée de manière à former un trop plein qui entretient la constance du niveau dans B, et permet d'envoyer hors de l'enceinte à épuiser l'eau qui pourrait venir de la source en quantité plus abondante qu'il n'est nécessaire pour le fonctionnement de la machine.

« L'appareil de distribution V s'applique, comme nous l'avons dit, à la partie inférieure de la caisse A au moyen de tire-fond et liens de fer. Il est également en bois. Il a été rendu indépendant de la caisse, de manière à pouvoir encore être employé, quand la hauteur de l'eau motrice et par suite celle de A change, en raison des circonstances où l'on se trouve obligé de faire des épuisements.

« Les trois orifices dont il est percé sont les suivants :

« 1° L'orifice C d'admission de l'eau motrice. Il a un diamètre un peu supérieur à celui du tuyau évacuateur; il est en outre évasé, afin d'éviter le phénomène de contraction pour la veine liquide qui le traverse. Il est fermé par une soupape métallique G, reposant sur une rondelle métallique H, qui forme le pourtour de C et sur laquelle elle a été préalablement rodée soigneusement, de manière à donner une fermeture hermétique. Dans notre appareil d'expérience, la rondelle était en fer et la soupape G était formée d'une plaque de laiton. Cette dernière porte en son centre un boulon K, fixé sur elle par deux écrous et terminé par un œil dans lequel s'accroche une vergette métallique L, dont nous indiquerons plus loin le rôle.

« 2° L'orifice E d'admission de l'eau à épuiser. Il a les mêmes dimensions que le précédent et présente le même évasement.

« Il est percé, soit dans la partie verticale de la caisse V et en face du tuyau évacuateur O, comme le représente le dessin, soit à la partie inférieure. Le choix entre ces deux positions sera déterminé par les circonstances où l'on se trouve. L'orifice est fermé par une soupape à charnière placée intérieurement et s'ouvrant de dehors en dedans.

« 3° L'orifice D forme l'entrée du tuyau évacuateur O, qui conduit au dehors, aussi bien l'eau motrice que l'eau que l'on épuise. Il a le même diamètre que ce tuyau et présente également un évasement

pour faire disparaître la contraction de la veine liquide. Comme l'indique le dessin, le tuyau O se recourbe pour traverser le batardeau formant paroi de l'enceinte à épuiser, et va déboucher dans l'eau qui entoure extérieurement ce batardeau. Il faut remarquer, en passant, qu'on pourra lui donner telle forme que suggéreront les besoins de la pratique, sans rien changer aux résultats, à la condition toutefois que les coudes qu'on pourra être obligé de faire aient un rayon assez grand.

« Nous avons dit plus haut que la soupape G d'admission de l'eau motrice porte en son centre un boulon K, sur l'œil duquel s'accroche la tringle L. Cette dernière vient s'attacher, à sa partie supérieure, en I, à l'une des extrémités d'un levier S qui porte un contre-poids R à l'extrémité opposée. Le point d'articulation du levier est dépendant de la caisse A, comme le montre le dessin. Un taquet, fixé sur la paroi de la caisse B, permet de régler la course du levier et, par suite, celle de la soupape G.

« **Jeu de l'appareil.** — Ces préliminaires posés, voici comment l'appareil se met en marche et fonctionne.

« L'appareil de distribution V plonge dans l'eau à épuiser, dont le niveau est figuré en X sur le dessin. L'eau motrice, venant de la source, remplit la caisse A B jusqu'au niveau du trop plein en B. En appuyant sur l'extrémité R du levier, on soulève la soupape G suivant la verticale, grâce aux guides M, N, qui règlent la direction de la tige L. Le contre-poids R la maintient alors dans cette position.

« L'eau motrice s'écoule entre la soupape G et son siège H, presse la soupape F qu'elle maintient appuyée sur l'orifice E et s'écoule par le tuyau évacuateur O. Mais, quant au bout d'un instant, généralement très court, l'eau a pris la vitesse la plus convenable que les conditions de maximum de rendement permettent de lui donner relativement à la hauteur de chute, il se produit dans la partie annulaire, comprise entre G et H, une diminution de pression considérable. La cause de ce fait paraît tenir en grande partie au phénomène des ajutages cylindriques.

« Cependant, il résulte d'expériences que nous avons faites, que la dépression est plus considérable que celle qui se manifeste dans l'expérience de Venturi (1). Quoi qu'il en soit, la pression tant hy-

(1) « Le phénomène de succion, employé ici pour faire fermer automatiquement la soupape G, est susceptible d'être employé avec avantage dans un certain nombre de machines hydrauliques. Dans ses

drostatique que dynamique de l'eau motrice sur la face supérieure de G donne naissance à un effort d'autant plus considérable que la surface de G est plus grande. Cette force tend à appliquer G sur son siège, et, en raison de l'articulation de la tige L au bout du levier S, ce mouvement se produira en surmontant la résistance qu'oppose le contre-poids R. Celui-ci sera alors soulevé, s'il a été convenablement déterminé, et la soupape G viendra fermer l'orifice C. C'est pour que cette fermeture soit toujours complète et hermétique que la tige L est mobile dans l'œil de K. De cette manière, on fait disparaître tous les défauts du mode de fermeture qui pourraient résulter de la non verticalité des guides M, N.

« La communication de l'eau motrice avec O est donc interrompue. Le contre-poids R se détermine très facilement par tâtonnements, de manière que cette interruption se produise sans choc appréciable. Cette condition se réalisera d'autant mieux que la section de A sera plus grande relativement à celle de C. Ajoutons, en passant, que ce mode de fermeture présente une telle sensibilité, que quelques grammes en plus suffisent pour empêcher l'eau de ramener G sur son siège, et c'est cette sensibilité même qui permet de faire le réglage de manière à éviter les chocs.

« Nous avons donc actuellement, dans le tuyau évacuateur O, une masse liquide d'un volume égal à celui du tuyau, masse animée d'une vitesse fonction de la hauteur de chute et aussi de la durée

nombreux mémoires, M. de Caligny a indiqué les principes de plusieurs de ces machines, nouvelles et fort simples, et où le fonctionnement du système, dépendant d'interruptions régulières d'écoulement d'eau, est assuré automatiquement par l'application judicieuse de cet effet de succion. Nous reviendrons à un autre moment sur quelques applications que nous en avons faites aux travaux publics.

« On conçoit toutefois que, si l'on a de grands orifices à fermer alternativement, la disposition que nous avons appliquée pourrait avoir des inconvénients au point de vue de l'herméticité de la fermeture, surtout si la hauteur de l'eau, au-dessus de G, devenait considérable ; car, au moment de l'interruption de l'écoulement, la soupape pourrait se gondoler sous la pression de l'eau.

« M. de Caligny a indiqué un autre dispositif dont nous donnons ici le croquis, fig. 2 et 3, et qui remédie aux défauts que nous signalons. Le clapet de fermeture est une soupape annulaire analogue à celle des machines de Cornouailles et dont le jeu se comprend à l'inspection seule de la figure qui la représente. Le contre-poids peut être noyé si l'on dispose d'un espace assez considérable.

de l'écoulement de l'eau motrice, quand l'interruption se produit avant que l'eau ait acquis toute la vitesse que peut lui communiquer la hauteur de chute. Cette sorte de piston liquide tend à continuer son mouvement en vertu de la vitesse acquise et à faire le vide derrière lui à la manière d'un piston rigide. C'est cette propriété du vide effectif produit dans son appareil, qui est utilisée par M. Leblanc pour faire monter l'eau à épuiser depuis le puisard jusqu'au point où elle rencontre l'eau motrice et est entraînée à la suite de cette dernière. Nous indiquerons plus loin les inconvénients de cette disposition.

« Dans le dispositif actuel, le vide qui tend à se produire continue à augmenter la force qui maintient G sur son siège, mais, en même temps, la soupape F est soulevée et l'eau à épuiser entre d'elle-même dans V et passe immédiatement dans le tuyau O. La masse de cette eau, qui sera ainsi entraînée, dépend de la quantité de travail mécanique susceptible d'être fournie par l'eau en mouvement dans O, de la différence de niveau de l'eau à l'intérieur et à l'extérieur du batardeau, du diamètre du tuyau évacuateur et, par suite, des frottements qui s'y produisent. On voit, d'après cela, qu'au bout d'un certain temps, d'ailleurs très court, cette quantité de travail sera dépensée, tant pour vaincre les résistances passives dans le tuyau que pour faire monter une certaine quantité de l'eau à épuiser en dehors du batardeau qui la contient.

« Ce mouvement d'entraînement mécanique de l'eau peut, jusqu'à un certain point, dans cette période de la marche, se comparer, pour le cas qui nous occupe, à celui de l'eau oscillant dans les deux branches verticales d'un syphon quand, par suite d'une cause quelconque, l'eau contenue dans la branche intermédiaire a reçu un mouvement dans un sens déterminé. Nous indiquons ici ce rapprochement parce qu'il permet de justifier certaines dispositions que suggère l'expérience. Quand une première oscillation sera arrivée à son point d'élévation maximum, il tendra à se produire une oscillation correspondante en sens inverse. L'eau contenue dans le tuyau évacuateur, prenant un mouvement en sens contraire, commencera par fermer la soupape F; en même temps, elle agira sur la face inférieure de la soupape G pour tendre à lui imprimer un déplacement de bas en haut. Cet effet sera aidé et accompagné par l'effort produit par le contre-poids R : la soupape G se soulèvera, l'écoulement de l'eau motrice recommencera comme précédemment et la même série de phénomènes se reproduira indéfiniment, tant que l'eau motrice arrivera en assez grande quantité pour

maintenir à peu près constant le niveau dans B. Nous disons à peu près ; car nous avons eu l'occasion d'observer que des variations dans ce niveau n'empêchent pas la continuation du mouvement automatique, quand elles ne se produisent pas dans des limites trop étendues en dessus et en dessous du niveau constant de B. Disons également que la course de la soupape est très courte. Dans les expériences que nous avons faites et dont nous parlerons plus loin, elle a varié entre $0^m,004$ et $0^m,006$.

« Comme on le voit d'après ce qui précède, il suffit d'une simple mise en marche pour que l'appareil continue ensuite à fonctionner de lui-même sans l'intervention d'aucune personne. Nous devons ajouter que, le plus souvent, la mise en marche n'est pas même nécessaire. Dans la série d'expériences que nous avons faites, nous avons vu généralement le mouvement se produire de lui-même quand, le tuyau évacuateur étant rempli, le contre-poids S avait au préalable été déterminé de manière à être très peu inférieur à l'effort qui se produit sur la face supérieure de la soupape G. Celle-ci éprouve comme une série de tressaillements après lesquels le mouvement s'établit franchement. Cet effet se manifestait d'une manière bien marquée quand, le tuyau O étant plein, on remplissait la caisse A B d'eau motrice jusqu'en B, niveau du trop-plein.

« Des considérations qui conduisent au principe même de la machine, il résulte *à priori* qu'il faut pour le rendement maximum que la longueur de la colonne liquide motrice, et par suite celle du tube évacuateur où elle se trouve, soit assez grande. C'est ce que confirme l'expérience. Pour bien s'en rendre compte, il faut se rappeler d'abord qu'il résulte des études de M. de Caligny, sur les oscillations dans les tuyaux, un principe essentiel pour ce dont il s'agit. En effet, ce savant a établi d'une manière bien nette, aussi bien dans son Mémoire sur ce sujet (*Journal de Liouville*, t. III) que dans ses applications ultérieures, qu'il y a toujours avantage (c'est-à-dire dans des limites très étendues, pourvu qu'elles ne conduisent pas à des vitesses trop petites), à augmenter la longueur de la branche intermédiaire qui réunit les deux tuyaux où l'eau oscille. La diminution des carrés des vitesses compense sensiblement l'augmentation de longueur. Si donc les résistances passives sont proportionnelles à ces carrés, les résistances locales, telles que celles des coudes, sont diminuées. Mais les résistances supposées par Prony, proportionnelles aux simples vitesses, changent l'état de la question quand les vitesses deviennent trop petites, et c'est ce qui arrive quand les diamètres sont trop petits. M. de Caligny a indiqué

(dans les Comptes rendus de l'Académie des sciences, 1er mai 1876) les principes au moyen desquels on peut calculer la longueur qui conduit au maximum de rendement pour des conditions données, ainsi que le débit le plus convenable pour une chute d'eau et des diamètres déterminés. Il résulte de son étude que ces éléments dépendent du travail perdu pour faire fonctionner les soupapes à chaque changement de période.

« **Expériences.** — Les premières expériences que nous ayons faites remontent à l'année 1876. Elles avaient eu lieu à propos des fondations d'un pont sur la Mayenne, dans un bief où nous avions à notre disposition de l'eau coulant à 2 mètres environ en contre-haut de celle qu'il s'agissait d'épuiser. L'appareil très imparfait que nous essayâmes nous donna des résultats satisfaisants au point de vue de l'effet produit; mais sa marche n'était ni régulière ni automotrice.

« Depuis nous les avons reprises avec le dispositif actuel en utilisant l'effet de succion que nous a indiqué M. de Caligny et en plongeant, suivant son conseil, l'appareil de distribution dans l'eau à épuiser. Nous avons opéré dans des conditions assez variées, mais surtout avec des tuyaux évacuateurs de $0^m,04$ et $0^m,07$ de diamètre. (C'étaient les seuls que nous eussions à notre disposition.) Nous parlerons plus spécialement des dernières expériences faites avec des tuyaux de $0^m,07$.

« Nous ferons remarquer au préalable que celles-ci, quoiqu'exécutées dans des conditions relativement assez bonnes, sont encore loin de donner les meilleurs résultats qu'on puisse attendre, à cause de la section encore assez faible des tuyaux. On conçoit, en effet, qu'en augmentant les diamètres, on diminuera les résistances dues aux frottements, et que, par conséquent, la quantité de travail moteur utilisé augmentera. Les résultats qu'on va donner doivent donc être considérés plutôt comme un minimum du rendement sur lequel on devra compter, que comme l'expression définitive de ce rendement quand on opère sur des masses d'eau plus considérables et avec une machine comportant des tuyaux de plus grand diamètre.

« Nous espérons pouvoir justifier pleinement cette assertion par les expériences dont nous allons bientôt nous occuper sur des tuyaux de $0^m,15$ de diamètre.

« Celles que nous avons exécutées ont été faites à l'établissement des eaux de Laval. La boîte prismatique A avait pour section un carré de $0^m,25$ de côté à l'intérieur. L'appareil de distribution

s'emboîtait à sa partie inférieure, comme l'indique, planche VII, le dessin de la figure 1, et le joint était soigneusement garni pour empêcher toute fuite. La section intérieure avait 0m,20 de côté ; elle était également carrée. La soupape G avait un diamètre de 0m,14. La section d'écoulement des orifices C et E avait 0m,08 de diamètre; celle des ajutages 0m,10. La soupape F était formée d'une plaque de cuir fort, rendu solidaire avec une plaque de tôle qui lui donnait de la rigidité et lui permettait de mieux s'appliquer sur le pourtour de l'orifice à fermer.

« La différence de niveau entre l'eau à épuiser et le point de déversement de l'eau motrice mélangée à l'eau épuisée entraînée a varié entre 0m,40 et 1m,20. La hauteur de chute de l'eau motrice, c'est-à-dire la différence entre le niveau B, et le point de déversement de O a varié de 0m,50 à 1m,50. Nous avons fait plus spécialement un grand nombre d'expériences avec une hauteur d'épuisement de 0m,60 et une hauteur de chute de 0m,70 à 0m,85. Nous avons obtenu dans ces conditions une série de résultats très concordants entre eux et qui nous montrent le rendement variant entre 0,70 et 0,80, soit en moyenne 0,75.

« Avec une chute motrice de 0m,70 et une hauteur d'épuisement de 0m,60 nous avions en moyenne trente battements par minute, c'est-à-dire trente ouvertures et autant de fermetures de la soupape G ; de telle sorte que, dans ce cas, le nombre de battements indiquait d'une manière sensiblement exacte la quotité du temps employé pour épuiser un volume d'eau déterminé.

« Avec une longueur de tuyau évacuateur de 8m,50 qui correspondait à peu près au maximum d'effet utile, nous épuisions en moyenne 42 litres par minute, soit 2mc,520 à l'heure. Nous avons plus spécialement étudié la machine avec les dimensions et dans les conditions que nous venons d'indiquer, parce qu'elles se rapprochent sensiblement de celles qui se rencontrent dans un cas pratique de travaux auquel nous voulons l'appliquer sous peu.

« **Discussion et conclusions.** — Pour les cas ci-dessus indiqués, la machine proprement dite, c'est-à-dire la caisse AB et l'appareil de distribution V, coûtait de 22 à 30 francs. Les tuyaux O étaient en zinc, les coudes en tôle, et d'une valeur de 3 francs le mètre courant. On voit par là combien cette installation est peu coûteuse et avec quelle facilité le tout peut être exécuté par les ouvriers même les moins expérimentés. Le seul point un peu délicat et où sa construction demande un peu de soin, consiste dans le rodage de la soupape G sur la rondelle H. Et encore cette

opération se fait-elle avec une très-grande facilité, avec une machine à percer ordinaire, comme en ont maintenant les moindres forgerons de campagne. C'est du reste de cette manière que nous avons obtenu une fermeture hermétique de l'orifice C.

« La machine peut donc s'exécuter partout et pour ainsi dire sans frais. Les ingénieurs qui ont à faire des travaux nécessitant des épuisements ont généralement dans leur matériel des tuyaux de pompe Letestu de différents diamètres. Ces tuyaux, dont quelques-uns sont flexibles, se prêtent admirablement à constituer les évacuateurs, en sorte qu'il n'y a réellement à faire exécuter, et par suite à payer, que les caisses A et V et leurs accessoires. En outre, comme il ne se produit pour ainsi dire pas de chocs dans le fonctionnement, la machine n'est soumise à aucune autre cause de détérioration que l'usure, et toutes les pièces qui la composent sont tellement rudimentaires qu'elles peuvent être fabriquées et remplacées partout. M. de Caligny nous a fait quelques observations relativement à la grandeur de la caisse V, dont les dimensions pourraient être réduites de manière à éviter une légère perte de force vive. Nous lui avons représenté que ces dimensions tenaient tant aux circonstances particulières de construction qu'aux matériaux mêmes que nous avons employés, et qu'en outre les dispositions prises avaient pour but de rendre le transport de l'appareil plus facile en permettant de le démonter aisément.

« Nous dirons maintenant, en quelques mots, quelles sont les différences essentielles qui distinguent cette machine de toutes celles qu'on a essayées jusqu'ici, en suivant le même ordre d'idées. Quoique Montgolfier ait indiqué lui-même le principe d'un bélier aspirateur devant servir aux épuisements, il ne paraît pas qu'il ait jamais réalisé sa conception. Hachette avait aussi décrit, dans son *Cours de machines*, deux dispositifs spéciaux qui ne paraissent pas avoir été employés dans la pratique.

« C'est à M. Leblanc que revient l'honneur d'avoir, pour la première fois, construit un appareil à marche automatique et fonctionnant d'une manière régulière. On trouvera dans les *Annales des ponts et chaussées* (1858, 1er semestre, p. 75) la description complète de l'appareil qu'il a employé, ainsi que le résumé des résultats qu'il a obtenus. Les galeries de l'École des ponts et chaussées renferment également un modèle à petite échelle du bélier, tel qu'il a fonctionné dans la pratique.

« Nous ne reviendrons pas ici sur le détail de cette machine; nous ferons seulement remarquer :

« 1° Qu'elle nécessite l'emploi d'une cloche à air qui n'existe pas dans notre appareil;

« 2° Que la colonne liquide motrice se trouve séparée de la colonne aspirée, et que, de l'aveu même de l'inventeur, ces deux colonnes, en se rencontrant, donnent naissance à une série de chocs avant que l'eau à épuiser soit mélangée à l'eau motrice et entraînée par elle ;

« 3° Que c'est le vide produit à l'arrière de la colonne liquide motrice, quand la soupape d'admission est fermée, qui donne naissance au mouvement ascensionnel de l'eau à épuiser : d'où résulte immédiatement cette conséquence, que ce bélier ne pourrait épuiser l'eau à une profondeur supérieure à la hauteur d'une colonne d'eau faisant équilibre à la pression atmosphérique ;

« 4° Que l'installation du bélier de M. Leblanc exige une place assez grande, que la dépense est assez considérable, eu égard à la nécessité d'avoir une cloche à air, des joints hermétiques, et qu'en raison de la multiplicité de ses organes le transport de cet appareil devient compliqué et dispendieux, à cause du volume et du poids des pièces, du démontage et du remontage, qui exigent de grands soins.

« Dans le Mémoire précité, on ne donne pas de résultats de mesures de rendements. On constate seulement qu'avec un modèle au dixième le rendement était de 33 p. 100.

« Les quelques remarques que nous venons de faire montrent bien, *à priori*, que le rendement ne saurait être bien considérable.

« Tout choc est une perte de force vive et, par suite, de travail disponible. Or, il y a choc à la soupape d'arrivée de l'eau, choc à la soupape d'arrêt, choc de la colonne motrice avec la colonne aspirée.

« Une autre cause de perte de rendement se trouve dans la disposition même de l'appareil. Le tuyau qui amène l'eau à épuiser contient, à chaque période de marche, un certain volume de cette eau : il faut donc à chaque fois dépenser une certaine quantité de travail pour mettre en mouvement la colonne liquide que contient ce tuyau. Enfin le rendement doit encore se trouver diminué en raison de la trop faible longueur des tuyaux qui contiennent l'eau motrice en mouvement.

« Dans la petite machine que nous venons de décrire, la plupart des inconvénients que nous signalons ont disparu. Tous les organes sont réduits au dernier degré de simplicité : nous n'avons plus de

cloche à air. L'appareil de distribution V plongeant directement dans le liquide à épuiser, cette dernière y entre sans choc. La colonne liquide ne se trouvant plus divisée, le réservoir d'air devient inutile, puisqu'on n'a plus de précautions à prendre contre les effets de l'inertie d'une colonne liquide, comme dans le bélier de M. Leblanc. L'eau à épuiser pénètre ici immédiatement dans le système, où elle n'a qu'à suivre l'eau en mouvement. C'est une simple veine liquide, et non une colonne proprement dite qui entre. En outre, *point essentiel*, l'épuisement peut se faire à toute profondeur et quelle que soit la hauteur de chute de l'eau motrice. Ce n'est plus ici la pression atmosphérique seule qui fait pénétrer l'eau à épuiser dans l'appareil. Dans le *Bulletin* cité plus haut de la Société philomathique, M. de Caligny s'exprimait ainsi : « Si une colonne liquide est en mouvement de bas en haut, quelle que soit la hauteur de cette colonne, quand on fermera un robinet à l'extrémité inférieure, il en résultera une succion, et, si une soupape s'ouvre à cette extrémité dans l'eau d'un puits, une certaine quantité de cette eau sera épuisée, quelle que puisse être sa profondeur, pourvu que cette extrémité plonge dans l'eau convenablement (1). »

« C'est le principe que nous appliquons ici.

Remarquons que notre machine tient peu de place, qu'elle se monte et se démonte avec la plus grande facilité et sans exiger de précautions bien grandes pour les joints, enfin que son rendement est très-considérable et comparable à celui des meilleures machines hydrauliques.

« Il faut observer que la machine fonctionne également bien quand l'extrémité du tube évacuateur O ne plonge plus dans l'eau, mais débouche purement et simplement dans l'air. Il suffit alors de lui donner l'une des deux formes indiquées en pointillé, planche VII, figure 1. Nous avons fait une série d'expériences dans

(1) « Nous ne voulons pas nous étendre trop longuement ici sur les différences bien tranchées qui existent entre notre machine et celle de M. Leblanc : M. de Caligny a bien voulu entretenir l'Académie des sciences de nos recherches au point de vue de l'application pratique des principes énoncés par lui, et des expériences auxquelles elles nous ont conduit. On trouvera dans les Comptes rendus de l'Académie (séance du 7 janvier 1878), une assez longue note de ce savant, où il fait l'historique de la question au point de vue de ses recherches propres.

ces conditions, et nous avons trouvé que le rendement n'était pas sensiblement changé.

« Ainsi qu'il résulte de l'exposition qui précède, la machine que nous venons de décrire pourra être employée avec utilité (et avantage au point de vue de la dépense) toutes les fois qu'on se trouvera dans les conditions indiquées au commencement de cette note, c'est-à-dire quand on aura de l'eau en quantité suffisante avec une certaine hauteur de chute, et sa propriété caractéristique consiste en ce qu'elle peut tirer de l'eau d'une *profondeur quelconque*, quelle que soit la hauteur de chute. Nous avons dit plus haut qu'avec $0^m,50$ seulement de chute nous avions eu une marche parfaitement régulière. En étudiant cet appareil, nous avions surtout en vue de l'appliquer aux épuisements que demandent les fondations de certains ouvrages d'art, les réparations à faire aux risbermes sous la chute des barrages, aux radiers des écluses, aux crapaudines des portes. Sous une forme éminemment portative, elle pourra se prêter à toute espèce d'épuisements dans les villes pourvues de distributions d'eau. Elle marche encore avec la plus grande régularité quand on lui fait aspirer de l'air au lieu d'eau. En la rendant portative, elle pourrait donc servir à retirer l'air vicié de certains endroits, notamment à enlever les gaz délétères des puits et fosses d'aisance.

« En résumé, cette machine est peu coûteuse, peu encombrante, se monte et se démonte sans difficulté ; elle a l'avantage de pouvoir s'exécuter partout, de se transporter facilement, d'être automotrice et surtout de pouvoir tirer l'eau d'une profondeur quelconque, ce que ne faisaient pas les béliers aspirateurs connus jusqu'ici.

« Laval, le 12 mars 1878.

NOTE SUPPLÉMENTAIRE

« Depuis que la notice précédente a été écrite, nous avons eu l'occasion d'appliquer, sur une plus grande échelle, les principes que nous venons d'indiquer et l'appareil que nous avons décrit. Il s'agissait de remplacer pendant les chômages de 1878 (août-septembre) les quatre vantaux de l'écluse de Bootz.

« Pour une écluse ordinaire de la Mayenne, et quand le débit de la rivière a suffisamment baissé par suite des chaleurs de l'été, cette opération ne présente aucune difficulté. Au moyen du pertuis

du barrage immédiatement inférieur, on vide le bief aval et on l'entretient dans cette situation, tandis qu'un bâtardeau en poutrelles établi à la tête amont empêche les eaux du bief supérieur de rentrer dans le sas.

« Mais à Bootz, nous nous trouvions dans des conditions toutes particulières. Le bief aval fournit la force motrice nécessaire au fonctionnement des turbines qui alimentent la distribution d'eau de Laval : c'est également dans ce bief que s'effectue la prise des eaux. On conçoit tout l'intérêt que la ville avait à ne pas manquer d'eau pendant l'été; et par suite l'impossibilité où nous nous trouvions de vider cette portion de rivière qui lui est utile à tant de titres.

« Notre machine nous a permis, moyennant une dépense d'environ 40 francs, de résoudre le problème sans recourir aux épuisements à bras d'hommes qui nous auraient coûté extrêmement cher. Ce que nous avons appelé la caisse A était un tuyau en tôle galvanisée de $0^m,36$ de diamètre, se terminant à $0^m,20$ environ en dessous de l'étiage amont. Il était surmonté d'un cylindre de même matière, de $0^m,56$ de diamètre, raccordé avec le premier et de hauteur telle que l'eau d'amont, dans ses variations accidentelles, ne pût jamais en surmonter les bords. Enfin, un tuyau de tôle galvanisée de $0^m,20$ de diamètre, passant au travers du bâtardeau amont, amenait les eaux motrices (celles du bief amont) à la hauteur du raccordement des deux tuyaux cylindriques dont nous venons de parler. L'appareil de distribution qui faisait corps avec le tuyau A avait $0^m,30$ de hauteur. L'orifice C avait $0^m,18$ de diamètre à la section contractée et $0^m,21$ à l'évasement. L'orifice E, ménagé à la partie inférieure horizontale, avait les mêmes dimensions. Les tuyaux évacuateurs étaient tout simplement des tuyaux de pompe Letestu de $0^m,15$ de diamètre, les uns en cuir, les autres en tôle. Nous n'étions évidemment pas dans les meilleures conditions possibles; car les tuyaux de cuir présentant, comme on le sait, une série d'étranglements et de renflements, absorbaient tout naturellement une certaine portion de la force vive et, par suite, du travail disponible. Comme nous n'avions rien autre sous la main, nous avions dû nous en contenter, malgré les inconvénients que nous leur reconnaissions à l'avance. Ces tuyaux traversaient le bâtardeau aval et se retournaient verticalement, de manière à présenter la forme indiquée en pointillé sur la pl. VII, fig. 1. Quoi qu'il en soit, notre machine, mise en marche immédiatement après l'établissement des bâtardeaux, a fonctionné nuit et jour pendant

un mois, sans surveillance et sans interruption. Elle a vidé le sas, qui était complètement plein au début et l'a maintenu à sec. Quand il ne contenait plus d'eau à épuiser, elle aspirait de l'air ; mais son fonctionnement continuait à être régulier et non interrompu. Elle donnait de 15 à 18 battements par minute. La hauteur de la chute motrice a varié de $0^m,75$ à $0^m,90$. C'est pendant la période de vidange du sas que nous avons pu constater approximativement la quantité d'eau qu'elle épuisait. Nous l'avons déduite de mesures directes faites sur l'abaissement du niveau dans l'enceinte formée par les bajoyers et les bâtardeaux. Elle a varié de 8 à 10 mètres à l'heure. Dans ce chiffre, nous n'avons pu tenir compte des rentrées d'eau par les joints imparfaits des poutrelles; aussi croyons-nous qu'il faut le regarder comme un minimum extrême et estimer beaucoup plus haut le volume que fournirait l'appareil dans une enceinte complètement étanche. On comprendra aisément que, dans les circonstances où nous nous trouvions, nous n'ayons pu faire d'expériences sur le rendement ; nous espérons y revenir plus tard. Aujourd'hui nous nous bornerons à constater que nos assertions antérieures sur la régularité de fonctionnement sont pleinement justifiées. Il en est de même pour ce que nous avions dit sur l'économie que procure l'emploi du système et sur ses propriétés automotrices. M. l'ingénieur en chef Batereau, chargé du service de la navigation de la Mayenne, a constaté, *de visu*, avec nous tout ce que nous venons de rapporter, et c'est sur son conseil que nous avons rédigé cette note supplémentaire.

« Ajoutons enfin que, dans la même campagne, nous avons appliqué le même appareil à l'écluse de Boisseau, sur la Mayenne, et que les résultats ont été aussi satisfaisants.

« Laval, le 29 mars 1879. »

Je vais reproduire un Mémoire, cité par M. Chemin, que j'ai publié en 1866 dans *le Journal de Mathématiques* de M. Liouville. Quelle que puisse être l'utilité pratique de la disposition qui y est décrite, je crois intéressant d'en conserver la trace, quoique l'appareil, sous la forme exécutée par M. Chemin, soit plus simple. Mais il y a des circonstances où il pourrait être difficile de disposer sur une assez grande

hauteur un réservoir ayant une section suffisante pour que la fermeture alternative de la soupape d'introduction de l'eau motrice n'occasionnât point un coup de bélier sensible. Il ne paraît donc pas sans utilité de montrer comment on peut tourner la difficulté en combinant le jeu de deux colonnes liquides avec un réservoir d'air alternativement comprimé.

Ce Mémoire peut, aussi, être considéré comme une sorte de pièce justificative, renfermant d'une manière bien nette un principe précité pour l'épuisement de l'eau à toutes les profondeurs.

Je crois intéressant, pour compléter d'ailleurs les idées sur un sujet aussi nouveau, de reproduire ce Mémoire, tout en recommandant plus spécialement, en général, la forme étudiée par M. Chemin. Il sera utile d'évaser l'extrémité par où sort l'eau élevée en ayant égard à ce que j'ai expliqué dans cet ouvrage sur la manière d'élargir les bouches de sortie, ce qui peut se faire encore plus graduellement que pour le mouvement permanent de l'eau, quand il s'agit des mouvements oscillatoires ou alternatifs. Cette recommandation a peu d'importance quand la longueur du tuyau dépasse certaines limites par rapport à son diamètre. Je reviendrai plus loin sur quelques phénomènes nouveaux, notamment sur l'espèce curieuse de trépidation qui permet de faire en sorte que certains appareils se mettent d'eux-mêmes en train.

En reproduisant le plus textuellement possible le Mémoire qui suit, j'ai mis, sous forme de notes, quelques détails secondaires, afin qu'on ne les confonde pas avec l'exposé des principes qui en sont le point essentiel. Ainsi, il y a plusieurs manières d'obtenir une marche automatique, et celle que j'avais indiquée dans ce Mémoire déjà ancien, ne paraît pas être la plus simple possible, comme on le verra dans la suite de cet ouvrage, pour des appareils analogues. Aussi dans la figure que j'y joins aujourd'hui, je ne représente que la disposition générale sans indiquer encore les moyens à employer pour faire fonctionner les divers orifices.

Principes d'une nouvelle machine pour les épuisements destinée à utiliser les grandes chutes d'eau et à tirer l'eau des puits très-profonds (1).

Considérations diverses sur les grandes colonnes liquides aspirantes, et sur les effets de la chaleur dans les colonnes d'air comprimé.

L'appareil dont il s'agit a été étudié relativement à un problème proposé à l'occasion d'un grand pluviomètre qui avait été projeté pour l'Observatoire de Paris, et aurait pu servir à élever de l'eau au moyen d'une grande chute pour faire des arrosages. Je suppose qu'un tuyau de conduite, qui aurait pu être, dans le cas dont il s'agit, un tuyau de gouttière, descende d'un réservoir contenant de l'eau à une hauteur considérable par rapport à celle à laquelle on veut élever de l'eau d'un niveau inférieur, à celui par exemple d'un jardin qu'on voudrait arroser. On pourrait en général produire l'effet voulu au moyen d'une machine à colonne d'eau faisant marcher une pompe.

Je me propose, sans employer au besoin une plus grande longueur de tuyau, de produire un effet semblable sans piston ni pompe, et sans changement brusque de vitesse, dans des circonstances où le bélier aspirateur de Montgolfier ne semble pas pouvoir être appliqué avec avantage par des raisons que j'expliquerai plus loin. On sait d'ailleurs combien les hydrauliciens désirent éviter l'emploi des pompes.

Le tuyau ABC descendant du bief supérieur, planche VII, figure 4, serait toujours plein d'eau et ouvert par le sommet. S'il est mis en communication à sa partie inférieure avec une capacité G contenant de l'air, et dans laquelle il entre par-

(1) Cet appareil a été présenté à l'Institut le 12 octobre 1857.

dessous en se recourbant verticalement, on conçoit qu'en supposant même qu'on négligeât la vitesse acquise dans ce tuyau pendant la compression de cet air, ce dernier serait bientôt soumis à une pression plus grande que celle qui serait due à la pression hydrostatique d'une colonne d'eau dont la hauteur serait égale à celle d'où l'on veut tirer de l'eau du niveau inférieur. Cette dernière est d'ailleurs beaucoup moindre dans une première hypothèse que la hauteur du bief supérieur au-dessus du réservoir d'air. Ce réservoir d'air peut être au-dessous du niveau inférieur d'où l'on veut tirer le liquide, du moins en général à une assez petite hauteur au-dessus.

Si l'on interrompt la communication entre cette capacité remplie d'air et d'eau qui est arrivée par-dessous, et le tuyau descendant du bief supérieur, pour l'établir entre cette même capacité et un tuyau de conduite EF rempli d'eau comme le premier, mais ne s'élevant par son extrémité supérieure toujours ouverte que pour déboucher dans un réservoir disposé à la hauteur où l'on veut, par exemple, faire des arrosages, l'air comprimé agissant sur l'eau de ce dernier tuyau y engendrera graduellement de la vitesse.

Or, si, quand cette vitesse sera suffisante pour l'objet qu'on se propose, les communications sont rétablies comme ci-dessus, c'est-à-dire le tuyau d'amont étant ouvert et le tuyau d'aval étant bouché, l'eau en mouvement dans ce dernier exercera une succion sur ses parois inférieures. Mais si un clapet disposé à cette extrémité permet à l'eau d'un réservoir inférieur, d'où l'on veut la tirer, d'entrer par un tube particulier L dans le tuyau d'aval, elle sera aspirée en vertu du mouvement acquis dans ce dernier tuyau, jusqu'à ce que la vitesse y soit éteinte. Pendant que cet effet se produira, l'air sera de nouveau comprimé par la colonne d'amont, et l'on conçoit que ces mêmes effets pourront se reproduire indéfiniment.

Pour mieux préciser ma pensée, j'ai d'abord supposé une très grande différence entre les hauteurs des colonnes liquides d'amont et d'aval. Mais il est intéressant de remarquer qu'il pourrait ne pas en être ainsi, surtout si l'on tenait compte de la vitesse acquise dans la colonne comprimante pendant la compression de l'air, ce qu'il convient en général de ne pas négliger. Cependant, il était utile de montrer qu'à la rigueur on pourrait négliger cet effet, par exemple, dans le cas où l'on voudrait établir un appareil de ce genre pour tirer l'eau d'un puits dans une ville dont les tuyaux de conduite pourraient avoir une charge d'eau considérable, mais où l'on craindrait peut-être, du moins dans les premiers essais, qu'il n'y eût des espèces de coups de bélier, si l'air était comprimé dans un réservoir d'une petite étendue, au lieu de l'être dans un grand récipient analogue à celui d'une machine de Schemnitz.

Dans l'un et l'autre cas, il est intéressant de remarquer que l'*eau peut être élevée d'un puits d'une profondeur quelconque au moyen de ce principe*, pourvu que le réservoir d'air soit à une profondeur suffisante. En effet, quelle que soit la hauteur d'une colonne liquide, si elle est en mouvement de bas en haut, on conçoit qu'elle tend à faire le vide à son extrémité inférieure, comme le ferait un piston qui serait mû de bas en haut à cette profondeur, jusqu'à ce que la vitesse acquise de la colonne liquide, ainsi devenue aspirante, soit éteinte.

Ce *principe de l'emploi du mouvement acquis de bas en haut par une colonne liquide d'une hauteur quelconque* n'a pas seulement pour objet cette machine particulière qui offre un exemple de ses applications ; c'est un principe général qu'il est intéressant de signaler (1).

(1) Je vais maintenant indiquer des dispositions au moyen desquelles cet appareil peut fonctionner de lui-même. Je suppose, pour simplifier, que les eaux motrices sont des eaux de pluie, et je ne présenterai d'abord que la combinaison la plus facile à comprendre sans figure,

Il n'est pas nécessaire que les tuyaux aient un grand diamètre pour éviter une trop grande perte de travail par les frottements de l'eau, parce que le réservoir d'air permet, comme je viens de l'indiquer, de régler à chaque période les courses des colonnes liquides, de manière à ne pas laisser développer des vitesses plus grandes qu'on ne le veut. Mais il est utile que le tuyau d'aval, dans certaines circonstances, ait un plus grand diamètre que le tuyau d'amont, quand la colonne d'amont sera beaucoup plus haute que celle d'aval. En effet, dans cette hypothèse, le travail de l'air comprimé sous une pression beaucoup plus grande que celle de la colonne d'aval pourrait engendrer de trop grandes vitesses dans cette dernière, pour qu'il n'en résultât pas beaucoup de frottement, si elle n'était pas convenablement élargie.

Il n'est pas nécessaire que le réservoir d'air soit plongé dans l'eau à épuiser. Il est plus commode qu'il soit en général un peu au-dessus, le plus près possible cependant de son niveau, afin que la colonne liquide contenue entre le réservoir d'air et l'eau à épuiser soit la plus courte possible. Mais on peut se servir de ce système pour vider un bassin au

n'attachant d'ailleurs qu'une importance secondaire à ce genre de détails, qui ne peut être bien étudié que dans des applications.

On conçoit que la capacité contenant de l'air peut être mise alternativement en communication avec chacun des deux tuyaux d'amont et d'aval, au moyen d'un tube vertical mobile, bouché par le fond, ouvert par le sommet, et percé d'un orifice latéral, offrant en définitive un tiroir d'une forme analogue à celle des tiroirs que j'ai employés dans mes premiers appareils, dont j'ai donné les dessins dans un Mémoire intitulé : *Résumé des expériences de* M. Anatole de Caligny *sur une branche nouvelle de l'hydraulique*, publié dans le *Technologiste*, en 1850 (1).

Il est à remarquer qu'en vertu de cette disposition, la pression de l'air comprimé fera descendre ce tiroir, si son déclic est lâché en temps utile, et qu'en vertu de cette même pression, un contrepoids peut être

(1) On trouvera, figure 3 planche I, de la première partie de cet ouvrage, le dessin du tiroir dont il s'agit, et à la page 97, quelques explications sur lesquelles je reviendrai ultérieurement en décrivant d'autres appareils. Il n'y avait pas de figures dans l'ancien Mémoire que je reproduis, n'ayant pour but que de bien préciser des principes avec pièce justificative.

moyen d'un tuyau d'aspiration jusqu'à la limite de profondeur où l'aspiration peut se faire.

Il est utile que les tuyaux d'amont et d'aval aient des longueurs développées convenables. Ces longueurs peuvent même être disposées de manière que, si elles sont assez grandes nécessairement, à cause de la disposition des lieux, pour qu'on ait à s'occuper sérieusement des frottements, l'eau ne s'arrête jamais, ni dans l'un, ni dans l'autre, pendant un temps sensible, ce qui permettra de diminuer beaucoup la moyenne des vitesses, et, par suite, les résistances passives pour une même quantité d'eau débitée. On conçoit, en effet, que l'écoulement au moyen de deux réservoirs d'air peut commencer dans l'un quand il finit dans l'autre.

Il n'est pas indispensable qu'il y ait un clapet dans le tuyau d'amont, pour empêcher le mouvement de retour quand l'air

soulevé, quoique ayant assez de force pour relever ensuite ce tiroir, lorsqu'un autre déclic sera lâché à une époque convenable quand l'air se sera détendu dans les limites voulues.

Pour que ces effets se produisent, il n'est pas nécessaire que la détente de l'air comprimé fasse descendre sa pression au-dessous de celle de la pression atmosphérique. Or, si un flotteur est alternativement soulevé par l'eau dans le réservoir d'air, on conçoit qu'il est facile de s'en servir pour lui faire alternativement lâcher les deux déclics dont je viens de parler, ce flotteur pouvant d'ailleurs faire fonctionner une tige traversant les parois, sans laisser passer l'air au moyen de dispositions connues.

Cette capacité est la seule partie du système où l'eau doit revenir bien sensiblement en arrière. Maintenant on demandera d'après quels principes on doit régler les dimensions de ce réservoir d'air. Cela dépend des dispositions du tiroir, présenté ici comme exemple d'application, et auquel d'autres moyens pourraient être substitués. Mais il suffit, en général, de donner à ce réservoir d'air des dimensions plus grandes que cela n'est absolument nécessaire, quand on veut se servir de la vitesse acquise de la colonne d'amont. En effet, on peut réduire l'espace occupé par l'air, en y introduisant préalablement de l'eau, et il sera facile d'obtenir par expérience la quantité dont il sera le plus convenable de réduire ainsi cet espace.

Cela permet d'avoir plus de place pour disposer le flotteur avec facilité, et cela a d'ailleurs l'avantage de varier, si l'on veut, les quantités d'eau débitées par un même appareil. S'il y a plus de chemin à par-

est comprimé à son maximum en vertu de la vitesse acquise. Cependant, il pourra être prudent d'en disposer un immédiatement au-dessous du réservoir d'air. On conçoit qu'il est naturel de choisir ce point s'il y a deux réservoirs d'air disposés sur une bifurcation, et que, d'ailleurs, il est convenable de ne pas disposer ce clapet à une distance où, s'il y avait quelque mouvement en retour, il en résulterait un petit coup de bélier plus qu'inutile.

Cet appareil est moins simple que le bélier aspirateur de Montgolfier; aussi, je ne le présente encore spécialement que pour les grandes chutes motrices, ou pour tirer l'eau de très grandes profondeurs d'après le principe exposé ci-dessus; je veux dire quand ces profondeurs seront plus grandes que la hauteur d'une colonne d'eau faisant équilibre à la pression atmosphérique.

Voici, selon moi, par quelles raisons le bélier aspirateur, tel qu'il est décrit par Montgolfier, ne paraît point applicable à une grande chute devant servir à tirer de l'eau d'une petite profondeur. D'abord, il serait impossible d'y appliquer la disposition la plus connue, dans laquelle le tuyau d'aspiration est le plus près possible de l'origine du tuyau d'amont, si ce tuyau, comme pour le projet relatif au pluviomètre projeté à l'Observatoire, descend d'une grande hauteur, et, a par conséquent, un développement déjà considérable quand il arrive au point d'où l'on veut tirer l'eau.

Mais il y a une autre disposition très curieuse que Hachette dit avoir été employée avec succès. L'eau en mouvement

courir à chaque période, la moyenne des vitesses sera évidemment augmentée. Comme il ne s'agit ici que d'exposer des principes, je n'entrerai pas dans plus de détails sur les moyens d'exécution.

Je suppose l'appareil en repos, et le tuyau d'amont bouché. L'eau du tuyau d'aval comprimera l'air à l'intérieur de sa capacité, de manière que le flotteur n'agisse sur aucun des deux déclics; il suffira de lâcher un de ces déclics avec la main, pour que l'appareil se mette en marche, celui qu'on lâchera permettant au tuyau d'amont de se déboucher.

arrive contre un matelas d'air disposé à l'extrémité d'aval du tuyau de conduite ou corps de bélier. Quand cet air est comprimé en vertu de ce mouvement, il se détend en refoulant la colonne liquide vers le bief d'amont. Or, on profite de cette détente pour faire aspirer l'eau d'un niveau inférieur par un tube particulier débouchant dans la capacité du matelas d'air. Je rappelle seulement le principe sans entrer dans les détails.

Si cette disposition est applicable à certaines chutes médiocres, elle offre une sérieuse difficulté pour les grandes chutes qui dépassent la hauteur d'une colonne liquide faisant équilibre à la pression atmosphérique, pour les chutes d'une quinzaine de mètres par exemple.

On conçoit, en effet, qu'il en résulterait des pressions très considérables auxquelles le matelas d'air devrait être soumis, en vertu de la vitesse acquise de la colonne liquide, afin que l'oscillation en retour dont je viens de parler pût, en refoulant la colonne d'eau, lui imprimer assez de vitesse en arrière pour produire une aspiration d'une certaine force.

La difficulté devient encore plus évidente, si la profondeur d'où l'on veut aspirer l'eau est assez grande ; si, par exemple, elle est au moins de 5 ou 6 mètres, non seulement il faudrait que les pressions produites sur le matelat d'air fussent très grandes, mais il faudrait qu'à chaque période on laissât écouler une quantité d'eau motrice assez notable pour obtenir ces pressions; de sorte qu'il en résulterait une augmentation assez considérable de frottements et d'autres résistances passives, pendant que la vitesse de sortie serait engendrée.

Il n'y a aucune difficulté de ce genre dans le système objet de cette Note : l'eau n'y revient point sensiblement vers le bief d'amont, et il ne serait pas même indispensable que l'air se détendît au-dessous de la pression atmosphérique, s'il n'en résultait pas un moyen employé par Montgolfier pour entretenir l'air de ses récipients, moyen qui peut être appliqué à l'appareil dont il s'agit.

Il est à remarquer que la compression pouvant se faire près du niveau de l'eau à épuiser, et même à la rigueur au-dessous, la hauteur de la colonne d'amont, dans l'hypothèse ci-dessus d'une quinzaine de mètres, étant augmentée par exemple de 5 à 6 mètres, le chemin parcouru serait moindre, toutes choses égales d'ailleurs, que pour le matelas d'air dans la disposition que j'ai rappelée ci-dessus d'après Hachette, comme ayant été exécutée par Montgolfier.

Ce n'est point en vertu d'un écoulement préalable au niveau du bief d'aval que la compression se fera dans ce système, où l'eau partant du repos comprimera l'air en vertu de la vitesse graduellement engendrée, pendant qu'elle montera dans le réservoir d'air. L'eau motrice et l'eau aspirée sortiront ensuite ensemble au bief inférieur.

La compression de l'air est ici un moyen, tandis qu'elle constitue le résultat industriel à obtenir dans les compresseurs à colonnes liquides oscillantes qui ont fonctionné au moyen de grandes chutes d'eau, à Bardonnèche, pour le percement des Alpes.

Ainsi que je l'ai rappelé, dans un mémoire publié en 1860 par mes confrères de l'Académie des sciences de Turin, dans le *Journal de Mathématiques*, année 1862, etc., j'avais, depuis beaucoup d'années, signalé divers moyens de comprimer de l'air en laissant la force vive se développer dans une colonne liquide partant du repos, et vidant ensuite la chambre de compression, en employant d'ailleurs une oscillation descendante au-dessous du niveau d'aval, pour pouvoir comprimer des quantités d'air indéfinies en multipliant les périodes avec avantage.

L'objet de la Note que je publie aujourd'hui n'est pas le même; mais quoique la compression de l'air n'y soit employée que comme un moyen, il est intéressant de faire observer que cette compression alternative ne peut se faire sans une augmentation de chaleur d'où résulte une perte de travail. On a remarqué que si l'on comprimait de l'air avec une ma-

chine analogue à celle de Schemnitz, où, comme on sait, la colonne liquide comprimante débouche dans une capacité très large par rapport au tuyau de conduite d'amont, on éviterait, autant que possible, la partie du déchet provenant de ce développement de chaleur. Mais on sait qu'il résulterait de cette disposition une autre cause de perte de force vive provenant de ce que la colonne liquide comprimante s'évaserait dans un espace très large par rapport à sa section.

On peut, d'ailleurs, au moyen de mes expériences sur les rétrécissements des colonnes liquides oscillantes, montrer dans quelles limites assez étendues (1) on pourrait élargir la chambre de compression, sans que cette perte de force vive fût bien notable, de manière qu'on pût avoir moins de machines et profiter, jusqu'à un certain point, d'une diminution d'échauffement de l'air, à cause de la diminution des vitesses de la surface liquide comprimante.

Mais, pour l'appareil dont il s'agit, il se présentera, dans les applications, une circonstance singulière sur les conduites d'eau des villes, où, à chaque instant, les pressions en un point donné peuvent varier à cause des prises d'eau, par exemple à cause des bornes-fontaines des environs du point où l'on aurait besoin de tirer l'eau d'un puits.

Dans ces circonstances, il pourra être convenable de ne pas compter, pour une marche régulière automatique, sur les avantages pouvant résulter de l'emploi du mouvement acquis de la colonne liquide comprimante.

On conçoit, en effet, que si les pressions motrices étaient trop variables à causes des prises d'eau, cela changerait trop les conditions de la marche de l'appareil; si, au contraire, on comprime l'air dans un grand récipient, en ne comptant pour cela que sur la pression hydrostatique, un flotteur sera

(1) Il est facile de voir, même sans entrer dans des considérations délicates relatives à la théorie de la compression de l'air, qu'on pourrait au moins tripler la section de la chambre de compression des appareils à colonne oscillante de Bardonnèche.

alternativement soulevé. Or, il faudra bien qu'il finisse par atteindre la hauteur voulue pour faire décrocher un déclic, parce que la pression hydrostatique nécessaire finira toujours, avec le temps, par redevenir assez grande pour comprimer l'air au degré de tension voulu lorsque les prises d'eau seront arrêtées aux environs.

Quant aux cas où l'on emploirait la vitesse acquise de la colonne comprimante, il se présente une question théorique intéressante.

Il résulte de mes expériences sur les oscillations des colonnes liquides, que, dans des limites très-étendues, il y a toujours avantage pour le rendement des oscillations à augmenter la longueur de la partie constamment remplie d'eau d'un tuyau de conduite intermédiaire, quand le diamètre n'est pas trop faible, pourvu que cela ne conduise pas à des vitesses trop petites (1).

Il était naturel d'en conclure que, dans des limites très étendues, il serait utile d'augmenter la longueur développée du tuyau de conduite contenant la colonne liquide comprimante, sauf les raisons d'économie dans le prix d'établissement de l'appareil. En effet, si, toutes choses égales d'ailleurs, on a un moyen de diminuer les vitesses avec lesquelles on comprime l'air, on diminuera aussi le développement de chaleur pendant cette compression, d'autant plus qu'on peut encore diminuer, comme je l'ai dit ci-dessus, par un élargissement convenable de la chambre de compression, la vitesse de la lame liquide comprimante.

Quelques objections m'ont été faites relativement à ce point particulier, à cause des difficultés qui semblaient provenir de considérations délicates sur la nouvelle théorie de la chaleur. Mais il suffit de remarquer que si l'air s'échauffe moins, toutes choses égales d'ailleurs, sa tension, variable pendant la compression, sera moindre pour chaque volume

(1) Voir la première partie de cet ouvrage, et la page 613.

donné, et que, par conséquent, cela diminuera la quantité de travail résistant provenant de ce développement de chaleur contre la colonne comprimante.

J'ai proposé, en 1861, une méthode pour calculer la partie du déchet provenant du développement de la chaleur dans la chambre de compression d'une machine à comprimer de l'air, au moyen de colonnes liquides oscillantes, mises en mouvement par une chute d'eau. Cette méthode provisoire est suffisante pour montrer qu'à Bardonnèche la partie du déchet provenant de la perte de chaleur n'était pas à dédaigner (1).

Ici, le cas n'est pas le même, non seulement parce que la chute d'eau et la hauteur de la chambre de compression seront sans doute, en général, beaucoup moindres, mais parce qu'on ne donne pas à l'air le temps de perdre aussi complètement sa chaleur. On conçoit, en effet, que le travail employé à produire cette chaleur peut se retrouver, en partie du moins, pendant la détente ; la tension, variable il est vrai, qui résulte, pendant cette détente, de ce que l'air est plus chaud qu'à l'extérieur, est une cause qui agit sur la colonne d'aval pour lui imprimer de la vitesse.

Principes d'une nouvelle machine pour les épuisements, spécialement applicable au cas où l'eau à épuiser doit s'élever au-dessus du niveau de l'eau du bief supérieur de la chute motrice (2).

Modèle fonctionnant.

Un tuyau de conduite A B C, planche VII figure 5, descend verticalement d'un réservoir alimenté par les eaux motrices,

(1) Voir la première partie de cet ouvrage, pages 368 à 374.
(2) Cet appareil a été présenté à la Société Philomathique de Paris le

et débouche horizontalement par son autre extrémité, toujours ouverte et convenablement évasée, au-dessous du niveau du bief inférieur. Une soupape de Cornwall G G met alternativement en communication ce tuyau vertical avec un autre tube E F de même diamètre que le premier à son extrémité inférieure, mais qui se rétrécit graduellement pour contenir le moins d'air possible, et dont l'autre extrémité F recourbée débouche dans une capacité supérieure C alternativement remplie par l'eau élevée. Le premier tuyau est toujours rempli d'eau, le second, toujours rempli d'air dans sa portion rétrécie, arrive par son extrémité supérieure au-dessus de la capacité dont il s'agit; celle-ci communique, par un tuyau d'aspiration O D toujours rempli d'eau, avec le bief où l'on veut faire des épuisements; il plonge dans ce bief avec un clapet de retenue D. Dans le cas ou ce serait de l'eau du bief supérieur qu'on voudrait élever, ce serait dans ce bief que le tuyau O D d'aspiration devrait plonger.

Quand la soupape de Cornwall est ouverte, l'eau du bief d'amont descend dans le premier tuyau, en y engendrant graduellement de la vitesse. Lorsque la vitesse suffisante est acquise, cette soupape est soulevée en vertu d'un phénomène de succion, de sorte que le bout de tuyau mobile dont elle est composée réunit le premier tuyau de conduite au tuyau contenant de l'air, comme s'ils ne formaient qu'un seul et même tube.

Alors la colonne liquide dont je viens de parler continue à se mouvoir, et son sommet baissant de plus en plus permet à la colonne d'air de se dilater entre ce sommet et la capacité supérieure où l'on a au besoin introduit préalablement une quantité d'eau convenable ainsi que dans son tube d'aspiration supposé toujours plein. Il en résulte que l'eau du

23 février 1850; (voir le journal l'*Institut*. Voir aussi dans le même journal les extraits des procès-verbaux des séances de cette société, des 26 juillet 1851, et du 31 juillet 1852). Il peut servir aussi à élever de l'eau tirée du bief supérieur.

bief supérieur monte dans cette capacité jusqu'à ce que les vitesses des colonnes liquides soient éteintes. Or cette ascension se fait seulement à partir de l'époque où l'air est suffisamment dilaté, et l'on sait que dans les anciennes machines à air dilaté on perdait le travail employé à faire cette dilation préalable.

Dans cette nouvelle machine, l'eau contenue dans le tuyau de conduite qui descend du bief d'amont au bief d'aval revient en arrière, en vertu même de cette dilatation, à partir du moment où la vitesse de la colonne descendante est éteinte. La soupape de Cornwall est tenue appliquée de bas en haut sur ses deux sièges annulaires, tant que l'aspiration qui la tient fermée est assez forte, à cause de la manière dont l'air extérieur agit, par l'intermédiaire de l'eau, sur son anneau inférieur. Mais la cause qui la tenait soulevée malgré son poids n'existant plus, lorsqu'en vertu du retour de l'eau par son intérieur la densité de l'air est redevenue la même que celle de l'air extérieur, elle retombe tout simplement en vertu de son propre poids, pour que le jeu recommence, et ainsi de suite indéfiniment. Quand ce poids n'est pas trop grand par rapport à la force de succion qui doit la relever, il n'est pas nécessaire qu'elle soit convenablement équilibrée au moyen d'un balancier à contrepoids, dont l'emploi peut d'ailleurs être commode pour des raisons dont je parlerai ultérieurement. On va voir comment l'eau élevée sort de la capacité supérieure.

Un clapet I disposé dans cette capacité au-dessous du niveau d'un réservoir latéral, où l'eau élevée doit se verser pour être utilisée, empêche l'eau de ce dernier réservoir de rentrer dans cette capacité, mais permet à l'eau contenue dans cette dernière de sortir quand la densité de l'air intérieur est redevenue suffisante, comme pour des machines connues à air dilaté. Il ne serait pas même nécessaire que la densité de l'air intérieur redevint aussi grande que celle de l'air extérieur pour faire sortir l'eau élevée, si le niveau du

réservoir latéral était tenu à une hauteur déterminée pour cette condition (1).

Ce qui distingue l'appareil, objet de cette Note, c'est surtout l'emploi d'un travail qui, dans les anciennes machines à air dilaté, était perdu. Dans la machine à air comprimé, décrite ci-dessus, je donne aussi un moyen d'utiliser un travail qui, dans les anciennes machines à air comprimé, était perdu jusqu'à l'époque où la compression était suffisante pour soulever une colonne liquide de la hauteur voulue. Abstraction faite des applications dont ces deux nouvelles machines seront susceptibles, je crois devoir insister sur cette

(1) J'ai supprimé ce clapet dans le modèle fonctionnant que j'ai exécuté en 1852, au moyen d'un siphon renversé dont j'avais communiqué le principe à la Société Philomathique de Paris, le 24 août 1839, pour les anciennes machines à air dilaté, croyant alors être le premier qui eût indiqué la manière suivante de remplacer une soupape.

Une des extrémités de ce siphon débouche dans la capacité où l'eau est aspirée; l'autre débouche un peu au-dessus du niveau de l'eau dans le réservoir latéral où elle doit être reçue en définitive. Les branches de ce siphon descendent au-dessous du niveau de l'eau du bief supérieur, qui reçoit les eaux motrices.

A l'époque où l'aspiration se fait, l'eau descend dans la branche extérieure, et la colonne liquide, contenue dans la branche en communication avec la capacité où l'eau monte en vertu de cette aspiration, se trouvant suspendue à cause de la pression de l'air extérieur, interrompt la communication avec cet air, comme le ferait une soupape. Quand la densité égale à celle de l'air extérieur se rétablit graduellement, l'eau remonte dans cette branche extérieure et finit par en sortir en se versant dans le réservoir latéral où elle doit être utilisée, mais d'où elle ne peut revenir dans cette capacité, l'extrémité extérieure du siphon s'élevant au-dessus de l'eau de ce réservoir.

Je n'attache encore qu'une importance secondaire à cette disposition qui permet de supprimer un clapet dont les inconvénients sont connus pour ce genre de machines, mais en occasionnant des pertes de force vive. Aussi je ne rappelle ce siphon remplaçant une soupape, qu'afin de montrer comment le modèle a été exécuté, et peut l'être pour les cabinets de physique, il est d'ailleurs bien entendu que pour la pratique, je propose, quant à présent, une soupape I, tout en signalant cette disposition comme méritant d'être étudié, malgré les frottements qui en résultent.

circonstance qui permet au moins de compléter un point intéressant de la théorie des machines hydrauliques, en établissant des principes nouveaux.

On peut atténuer beaucoup l'inconvénient des machines à air dilaté remarqué par Hachette, en enveloppant les capacités et les tubes où l'air se dilate, par des *chemises métalliques* remplies d'eau, ce moyen paraissant très-propre à conserver aux parois une imperméabilité convenable à l'air extérieur.

J'avais très peu d'eau à ma disposition quand j'ai construit un modèle fonctionnant de cette machine, ayant seulement voulu m'assurer de la réalité de son jeu, en l'établissant d'une manière très provisoire, au moyen des débris d'autres expériences; j'élevais de l'eau du bief d'amont à beaucoup plus du double de la hauteur de chute au-dessus du niveau du bief d'aval. Il est évident qu'on pourrait, avec une petite chute et un seul réservoir à air dilaté, en un mot sans compliquer la disposition de ce modèle, élever de l'eau beaucoup plus haut, au moyen d'une dilatation convenable de l'air intérieur. Mais, au delà de certaines limites, il y aurait trop d'inconvénients. Cette dilatation causerait un mouvement de retour plus fort que cela ne serait convenable pour l'utiliser, en faisant rentrer de l'eau dans de bonnes conditions au bief supérieur à l'époque de l'ouverture de la soupape de Cornwall.

Il est facile de voir qu'on pourrait y appliquer une disposition ingénieuse de la machine de Branca (1) reproduite ou plutôt inventée à nouveau et modifiée d'une manière intéressante par de Trouville dans un mémoire dont une copie manuscrite est aux archives du conservatoire des arts et

(1) *Le Machine*, volume nuove e di molto artifizio del signor G. BRANCA, ingegniere et architetto della santa casa di Loretto. Roma, 1629. Il y a dans cet ouvrage, des combinaisons curieuses qui ne paraissent pas avoir été connues de de Trouville. Branca, dans une de ses figures, a mis un *grand aspirateur en bas*, comme de Trouville, afin d'élever de l'eau

métiers; mais je tâche autant que possible d'éviter ces complications, et je me contente pour le moment de proposer l'emploi d'une seule capacité aspirante.

Je réunis, en tâchant de les simplifier l'un et l'autre, le principe d'un bélier aspirateur et celui d'un appareil à air dilaté, en leur appliquant, comme intermédiaire, le jeu d'une colonne liquide oscillante qui les modifie complètement, et le jeu d'une soupape de Cornwall, reposant sur un genre particulier de succion.

Avant d'exécuter ce modèle fonctionnant, j'avais étudié ce mode de succion d'une manière qu'on pourra être bien aise de reproduire dans les cabinets de physique. Un vase en zinc portait au milieu de son fond un tube vertical fixe, ouvert à ses deux extrémités, et dont le sommet assez au-dessus de ce fond portait un rebord extérieur sous lequel l'anneau inférieur du bout de tuyau mobile, appelé soupape de Cornwall, venait s'appliquer quand le sommet de cette soupape venait s'appliquer aussi contre un anneau attaché à la partie inférieure d'un autre tuyau fixe, avec lequel il s'agissait de réunir le premier au moyen de cette soupape.

On bouchait d'abord la partie inférieure du premier tuyau, que l'on remplissait d'eau ainsi que le vase; or, quand on le débouchait subitement, la soupape de Cornwall se levait brusquement et réunissait les deux tuyaux en un seul.

Pour qu'elle se soulève, il n'est pas même nécessaire que l'extrémité inférieure du tube supérieur soit plongée dans l'eau. J'ai remarqué un soulèvement très-notable, même lorsque cette immersion n'avait pas lieu, et que l'extrémité

au-dessus du niveau de la chute motrice. Mais il le met dans une autre figure *en haut*, afin d'aspirer l'eau d'un puits, qui, par une combinaison de *petits aspirateurs* superposés, est obligée d'entrer d'abord dans le *grand aspirateur* pour en redescendre à la bauteur où elle doit être reçue avec les eaux motrices, bien entendu, au-dessous du niveau du bief supérieur. J'ai signalé à la Société Philomathique, le 27 décembre 1845, ces anciennes combinaisons, mais celles dont je m'occupe sont beaucoup plus simples.

supérieure du tube inférieur était seule plongée dans l'eau, ainsi que la soupape. Je ne sais pas encore si cela suffirait pour relever entièrement cette soupape dans certaines conditions; mais ce soulèvement m'a paru offrir quelque intérêt, parce qu'il se fait en sens contraire du mouvement des poutrelles qui s'immergent dans les déversoirs, en vertu d'un phénomène de succion connu.

Quant aux cas où la soupape de Cornwall se relève complètement, il y aura à faire des études assez variées sur son jeu pour diverses ouvertures; cette soupape, ou tube mobile de 1 décimètre de diamètre, se relevait très facilement à une hauteur égale à ce diamètre pour réunir les deux tuyaux fixes.

Il est intéressant de remarquer que l'appareil, objet de cette Note, *permet de ne pas mêler l'eau élevée avec l'eau motrice, comme cela se fait nécessairement dans les béliers aspirateurs.* Cette circonstance peut avoir quelque utilité à cause des qualités de l'eau qu'il s'agit d'élever.

C'est parce que les circonstances de la pratique sont extrêmement variées, qu'il est plus utile qu'on ne le croit généralement d'étudier ce genre de questions sous des points de vue très-variés, si l'on veut parvenir, dans beaucoup de cas, à se débarrasser de l'emploi des pompes.

On sait que Montgolfier disposait un réservoir d'air dilaté au sommet du tuyau d'aspiration, du moins pour la forme la plus connue de son bélier aspirateur. Il en résultait une complication qui n'est pas indispensable dans ce nouveau système, si l'on donne au tuyau de conduite inférieur une longueur convenable.

Dans cet appareil on utilise, ainsi que dans le précédent, le mouvement acquis de l'eau dans le tuyau de conduite, parce qu'on modère les vitesses de la colonne liquide en employant convenablement l'inertie, de manière à retrouver un travail perdu dans les anciens systèmes à air comprimé ou dilaté. Il est de plus intéressant de remarquer que le travail

qui, dans ces anciens systèmes, était employé, soit à comprimer l'air jusqu'au moment ou l'eau pouvait être soulevée par le ressort de cet air à la hauteur voulue, soit à dilater l'air jusqu'au moment où une colonne d'une hauteur donnée pouvait être mise en mouvement de bas en haut par la pression extérieure de l'atmosphère, était entièrement perdu.

On voit que, par des combinaisons très différentes, on peut, dans l'un et l'autre cas, obtenir la solution de ces deux problèmes qui ont dans leur but une analogie nouvelle et intéressante. Quelques études pratiques restent à faire, notamment quant aux moyens à employer soit pour entretenir l'air comprimé dans un des deux systèmes, soit pour entretenir convenablement les colonnes d'air alternativement dilatées dans l'autre appareil. Mon but dans ce que je viens d'exposer est de bien fixer les idées sur des principes nouveaux.

Afin de compléter ce que j'ai à dire sur les machines pour les épuisements fonctionnant au moyen d'une chute d'eau, il reste à examiner la manière de profiter de la baisse alternative d'une colonne oscillante pour y faire entrer de l'eau à épuiser; il suffit provisoirement de remarquer qu'il n'y a pour cela qu'à ajouter aux systèmes, auxquels cette idée est applicable, une soupape, comme je l'ai déjà indiqué ci-dessus. Mais l'utilité de ces dispositions ne sera bien comprise qu'après la description de chacune des machines auxquelles elle peut être appliquée Je tiendrai d'ailleurs à bien fixer les idées sur ce que, dès le début de mes recherches, j'ai donné des moyens de faire en sorte qu'à une *profondeur quelconque, une colonne liquide en mouvement de bas en haut, puisse être suivie par de l'eau à épuiser.*

Après avoir reproduit le plus textuellement possible mon Mémoire de 1866, sur deux machines pour les épuisements,

je vais ajouter quelques détails sur leurs propriétés. La première, qui est à air comprimé, a l'avantage de ne pas avoir d'oscillation en retour.

La seconde, qui est à air dilaté, applicable à quelques circonstances spéciales, n'a pas ce dernier avantage. Il y a du temps perdu à cause de l'oscillation en retour. On est obligé, par conséquent, de laisser prendre à l'eau des vitesses plus considérables et le long de chemins plus grands pour des tuyaux de sections données, afin d'obtenir un débit déterminé, ce qui est une cause d'augmentation de déchet, en supposant toutes choses égales d'ailleurs.

Le travail employé à dilater l'air avant l'époque où l'aspiration de l'eau à élever peut commencer, est utilisé en faisant rentrer de l'eau au bief supérieur, à la fin de chaque période. Mais si ce travail est considérable par rapport à celui qui est employé à élever l'eau d'une manière utile, il en résulte une perte notable de force vive d'après ce que je viens d'expliquer. Il resterait d'ailleurs à faire une étude sur la manière dont la rentrée de l'eau au bief d'amont, par la soupape de Cornwall, pourrait modifier le jeu de celle-ci, dans le cas où la vitesse de rentrée dépasserait certaines limites; d'autant plus que le mouvement de la veine liquide dans ce sens aurait peut-être, relativement aux phénomènes de succion, des propriétés différentes de celles du mouvement de l'eau dans l'autre sens.

Les deux systèmes dont il s'agit peuvent aussi servir, abstraction faite de tout épuisement, à élever une partie de l'eau du bief supérieur. J'ai expliqué comment alors devrait être disposée la machine à air dilaté ; mais elle paraît moins simple pour remplir cette condition qu'un bélier hydraulique élévatoire.

Quant à la machine à air comprimé, elle serait moins simple que le bélier dans le cas où il ne s'agirait que d'élever de l'eau du bief d'amont. Il n'est cependant pas sans intérêt de conserver la trace de la disposition suivante.

Je suppose que la colonne d'eau qui descend du bief d'amont parte du repos et trouve l'air du récipient à la même densité que l'air extérieur. Elle le comprimera à une densité beaucoup plus grande que celle qui ferait équilibre à la pression du bief d'amont, à cause du mouvement de la colonne d'eau, acquis pendant la compression.

On pourra donc, en interrompant la communication entre le récipient et le bief d'amont, pour l'établir avec un tuyau d'ascension s'élevant beaucoup plus haut que ce bief, faire monter de l'eau à une hauteur considérable au-dessus de celui-ci. Afin de recommencer, il suffira de rétablir les choses dans leur premier état.

Je suppose maintenant, qu'après avoir interrompu les deux communications précédentes, on en établisse une entre le récipient et le bief inférieur supposé à une certaine hauteur au-dessus du niveau de l'eau dans ce réservoir d'air. On conçoit qu'une oscillation par un tuyau de décharge, les choses étant bien disposées, fera redescendre l'eau dans le récipient à son niveau primitif, de sorte que ce qui restait de tension à l'air qu'il contenait au-dessus de celle de l'air extérieur, sera convenablement employé.

Abstraction faite même de toute application utile, il est intéressant de montrer ainsi comment un bon emploi du mouvement acquis des colonnes liquides peut modifier d'anciennes machines hydrauliques à air alternativement comprimé ou dilaté. Ainsi le principe de la machine de Schemnitz ne paraissait pas pouvoir servir à élever de l'eau, même à une hauteur égale à celle de la chute motrice. Or, on peut l'appliquer de manière à l'élever beaucoup plus haut. Le travail employé à comprimer l'air avant l'époque où la tension était suffisante pour *commencer* à soulever l'eau qui devait monter, était entièrement perdu. Je viens de montrer comment on peut l'utiliser, en disposant le réservoir d'air à *une certaine profondeur au-dessous du niveau du bief d'aval.*

Quant aux machines à air dilaté, celle qui est connue sous

le nom de de Trouville ne pouvait pas d'un seul jet, vers une seule capacité aspirante, élever de l'eau à une hauteur égale à celle de la chute motrice. J'ai montré ci-dessus qu'avec une chute ne dépassant pas certaines limites, on pouvait l'élever beaucoup plus haut, en indiquant, d'ailleurs, dans qu'elles conditions cela pouvait se faire, de manière à utiliser convenablement le travail employé à la détente de l'air.

Ainsi que je l'ai dit, pages 628 et 629, Montgolfier a employé la détente de l'air sur une colonne liquide en *mouvement* pour faire des épuisements. Mais l'application qu'il en a faite était bien moins généralisée qu'on ne pourrait le croire, d'après ce que j'ai dit dans ce passage d'un Mémoire que j'ai reproduit le plus textuellement possible. Cet illustre savant n'avait pas proposé d'employer ainsi la détente d'une colonne d'air, alternativement comprimée par une colonne d'eau en mouvement, sans que le matelas d'air dont il s'agit *fît partie d'un bélier principalement destiné à élever de l'eau au-dessus du bief d'amont.*

Il est facile de voir que l'appareil supposé, réduit à un corps de bélier avec soupape d'arrêt et matelas d'air ayant un tuyau d'aspiration avec clapet de retenue, ne pourrait marcher que dans de très mauvaises conditions, s'il n'avait ainsi pour but que de faire des épuisements. Depuis que la page 629 est réimprimée, j'ai pensé qu'on pourrait en conclure que les inconvénients de cette forme d'appareil, reposant sur la détente alternative du matelas d'air, consisteraient surtout en ce que les résistances passives seraient plus grandes et auraient à parcourir plus de chemin que cela ne serait nécessaire et en ce que les pressions alternatives seraient augmentées. Quant à ce dernier point, d'ailleurs, il suffirait sans doute d'avoir des tuyaux d'une plus grande épaisseur.

Mais j'aurais pu me borner à dire que le *problème dont il s'agit, quant à cette forme de système, n'était pas résolu*, et

que Montgolfier ne paraissait pas même s'en être occupé (1).

Or, il est bien à remarquer qu'au moyen de mes principes, une forme analogue de l'appareil pourrait être employée d'une manière convenable, sans qu'il fût nécessaire de faire détendre le matelas d'air à une densité moindre que celle de l'air extérieur. On disposerait convenablement la soupape d'arrêt un peu au-dessus du niveau du bief inférieur, afin que l'eau de celui-ci ne pût pas rentrer dans l'appareil. On conçoit que la colonne liquide, après avoir comprimé le matelas d'air supposé de dimensions convenables, pourra ensuite être repoussée bien au-dessous du niveau du bief inférieur. Si donc une soupape permet alors à un liquide, dont le niveau est au-dessous de ce bief, d'entrer dans le tuyau, la colonne liquide, quand elle reprendra un mouvement de bas en haut, fermera cette soupape, et fera sortir au bief d'aval l'eau qui aura été prise ainsi à un niveau inférieur à celui de ce bief. Le liquide à épuiser précèdera ainsi l'eau motrice de la seconde période au lieu de la suivre, quand elle sortira de l'appareil.

Je reviendrai ultérieurement sur ce système que j'ai décrit dans les *Annales des Mines*, année 1838, page 455, tome XIV

(1) La soupape d'arrêt étant fermée, et le matelas d'air étant comprimé, il se ferait, en vertu de sa détente, une première aspiration. Mais cette soupape se rouvrirait d'elle-même beaucoup trop tôt, et l'on ne trouve nulle part l'indication d'un mécanisme quelconque pouvant la faire fonctionner convenablement pour ces conditions.

Dans le bélier hydraulique *élévatoire*, on profite, pour la faire retomber, de la détente du matelas d'air qui sert pour aspirer une quantité d'eau *dont l'élévation n'est qu'une chose accessoire*. Mais ici cette détente ne serait plus un accessoire. Elle devrait, au contraire, pour être utilisée convenablement, *agir précisément à l'époque où cette soupape serait fermée*. Il ne serait pas d'ailleurs rationnel de la faire ouvrir pendant cette détente; cela serait évidemment une cause de perte considérable de force vive. Il serait convenable de ne la faire ouvrir qu'à l'époque où la densité de l'air intérieur serait redevenue sensiblement égale à celle de l'air extérieur. On voit combien le mécanisme devrait avoir de précision, et combien cela semblerait devoir s'éloigner de la simplicité du bélier.

de la 3e série. J'en dis ici quelques mots seulement pour compléter l'exposition des principes précédents. Quant à la pratique, je préfère en général la forme du bélier aspirateur employée par M. Chemin, pour laquelle il n'est pas nécessaire de laisser la colonne liquide prendre d'aussi grandes vitesses, de laisser parcourir aux résistances passives des chemins aussi longs, ni de produire des pressions aussi considérables.

Expériences et considérations diverses sur une nouvelle pompe conique sans piston ni soupape, dont le moteur agit de bas en haut.

Cette pompe se compose, planche VII, figure 6, de deux tuyaux, l'un conique, l'autre cylindrique OF, ayant le même axe, ouverts à leurs extrémités et soudés ensemble en O, le tuyau cylindrique étant au-dessus et la plus grande section du tuyau conique étant à l'extrémité inférieure du système. L'eau élevée est reçue dans un vase annulaire fixe D, au milieu duquel le sommet du tuyau cylindrique a la liberté de passer, toutefois avec le moins de jeu possible. Ce tuyau est suspendu à une des extrémités d'un balancier CQ par une anse à laquelle est attachée une corde ou une chaîne B, et cette anse est soudée à l'intérieur, afin de ne pas gêner le mouvement du tuyau A dans le milieu du vase annulaire où un bout de tube sert de guide (1).

(1) Cette figure est la copie de celle qui a été gravée page 318 du bulletin de la Société centrale des architectes pour l'exercice de 1857, dans un rapport sur ma pompe conique. Ainsi que je l'expliquerai plus loin, les sections indiquées dans ce dessin sont un peu trop grandes pour qu'un homme de force ordinaire puisse la faire fonctionner sans fatigue. Mes premières expériences en petit sur ce système ont été présentées à la Société Philomathique en 1840 et 1841. Mais les expériences en grand, qui ont permis de compléter les études sur ce sujet, n'ont été faites qu'à partir du mois de mai 1851.

Dans le premier modèle essayé en grand, le tuyau cylindrique et le tuyau conique ont chacun $1^m,90$ de long. La plus grande section du tuyau conique a 25 centimètres de diamètre. Le tuyau cylindrique a un diamètre de 9 3/4 centimètres. Le tuyau conique est en zinc n° 14, le tuyau cylindrique est en zinc n° 13. Il n'y a pas de guide inférieur.

Pour faire fonctionner l'appareil ayant pour but, par exemple, d'élever l'eau d'un puits dont le niveau EE, entretenu par un courant souterrain, serait toujours à une hauteur suffisante au-dessus du fond, il suffit de soulever alternativement le tuyau en s'arrêtant de manière qu'il soit sensiblement en repos à l'époque du versement supérieur. On le laisse ensuite retomber par son propre poids, et ainsi de suite indéfiniment. Le balancier est en bois avec arc de cercle en Q pour maintenir la verticalité.

Le jet qui sort au sommet, à chaque période, et dont la hauteur dépend de la force avec laquelle on met le tuyau en mouvement, est en forme de *champignon*, de sorte qu'il ne peut passer que très peu d'eau entre le tuyau fixe du réservoir annulaire et le tuyau mobile; on verra plus loin comment on peut augmenter la divergence de cette espèce de *champignon*. Pour un appareil de ces dimensions, élevant l'eau à $1^m,50$ au moins au-dessus du niveau de la citerne, il y a trente périodes par minute, chaque période comprenant une ascension et une descente du système. Quand on élevait l'eau à $1^m,20$, il y avait ordinairement vingt-quatre périodes par minute.

Il est à remarquer que si l'on fait marcher le tuyau trop vite ou trop lentement, on ne sent que très peu de résistance, mais aussi il ne sort plus d'eau par le sommet. Pour saisir le mouvement convenable il faut, comme on l'expliquera plus loin, s'abandonner au mouvement naturel de l'homme agissant sur le levier d'une pompe ordinaire et ne faire aucun effort en se relevant. Les courts instants de repos qui permettent à l'eau de se verser quand une hauteur constante est atteinte

par le tuyau sont très commodes. Les repos de ce genre sont d'ailleurs, comme on sait, recommandés en général pour l'emploi de la force de l'homme. Aussi il y a des ouvriers qui saisissent facilement le genre de mouvement nécessaire pour que l'appareil élève une quantité d'eau convenable par la raison même qu'ils s'abandonnent à un mouvement naturel; il y a au contraire des savants qui n'ont pas facilement saisi le mouvement nécessaire.

La quantité d'eau élevée paraît, comme on verra plus loin, au moins égale à celle que fournit une bonne pompe ordinaire; toutes choses égales d'ailleurs, l'avantage resterait cependant à celle qui n'a aucune pièce susceptible de se déranger, et coûte en définitive beaucoup moins cher, comme tout le monde peut en faire le calcul d'après le prix connu des matériaux.

Avec le même appareil, la hauteur du versement de l'eau au-dessus du niveau de la citerne a pu être considérablement augmentée, elle s'est élevée jusqu'à 2m,30. Mais pour ces diamètres la colonne liquide est alors trop divisée par suite des mouvements de l'air, tandis qu'il n'en est pas ainsi pour les hauteurs analogues à celle de 1m,50. Dans ce dernier cas, si l'on règle le jeu de manière que l'eau arrive au sommet sans sortir, on voit que la surface ascendante n'est pas même en entier recouverte de bouillons. On peut faire marcher l'appareil sans effort avec une seule main pour ces dimensions; une jeune fille de quinze ans a même pu le faire marcher sans fatigue.

Il est essentiel de remarquer, quant au principe, que l'appareil n'agit point en descendant comme le fait une *canne hydraulique*. Lorsqu'on veut réunir les deux effets, comme cela se peut dans un très petit modèle, il paraît pour ces dimensions difficile, sinon impossible, de mettre l'appareil en train au moyen de la force de l'homme.

Quand on soulève le tuyau une première fois, il tend à se faire, entre la paroi conique et l'eau qu'elle contient, une

sorte de *vide conique annulaire,* d'où résulte une descente du niveau intérieur au-dessous du niveau extérieur de l'eau dans le puits, et par suite une oscillation ascendante à la période suivante ; on saisit pour agir le moment où l'on sent de la résistance, et ainsi de suite. A la seconde période ou à la troisième, l'eau sort par le sommet et l'appareil est en train. On est instinctivement averti, par le bruit de l'eau tombant dans la bâche annulaire, qu'il faut laisser retomber de lui-même le tuyau qui doit entraîner le bras de levier sur lequel on agit alternativement. La course du tuyau est assez petite par rapport à l'élévation de l'eau.

Il est intéressant de se rendre compte du mode d'action de cette tendance au *vide conique annulaire* sur lequel repose le jeu de cet appareil. Le tuyau en se relevant rencontre au-dessus de lui la pression de l'eau ambiante. Il éprouve un frottement de la part de cette eau dans son mouvement. Quant au frottement à l'intérieur, il est sans doute en partie employé à l'élévation de l'eau. L'angle de l'entonnoir est trop aigu pour que la *résistance du milieu* soit bien nuisible. L'orifice inférieur ayant un grand diamètre par rapport au tuyau cylindrique, il ne paraît pas que la perte de force vive en ce point soit importante par rapport à celle qui résulte du versement au sommet du tuyau cylindrique, même quand ce versement se fait à une hauteur maximum de 2 décimètres environ au-dessus de ce sommet.

Quand l'eau ascensionnelle pénètre dans le tuyau cylindrique, au-delà de certaines limites, le *vide conique annulaire* ne peut être prévenu autrement que par suite de l'entrée de l'eau à l'extrémité inférieure du système. L'appareil doit donc alors être considéré comme *une véritable pompe aspirante*, et c'est un genre d'effet entièrement nouveau. Aussi, quand le moteur cesse d'agir sur l'autre extrémité du balancier, la force vive quelconque du tuyau en mouvement ne permet pas à ce tuyau de continuer à s'élever de la même manière que dans les circonstances où le jeu n'est pas bien réglé. Elle

est employée à produire une aspiration, d'où résulte une augmentation ou un mode d'*entretien* quelconque de la quantité de force vive de la colonne liquide ascendante.

Pour de plus grands diamètres, il y aura moins de frottement, moins de chances de bouillonnement, l'effet utile sera plus grand, et l'eau pourra s'élever plus haut avec avantage.

Ce système, quand l'axe est rectiligne et vertical, a deux inconvénients : 1° l'eau doit être à une assez grande profondeur au-dessous du niveau d'où elle doit être épuisée, c'est-à-dire que l'extrémité inférieure du tuyau ne doit pas rencontrer le fond, ni même s'en approcher assez pour qu'il en résulte un étranglement annulaire trop sensible; 2° il faut un certain apprentissage pour mettre l'appareil en train.

Ces deux inconvénients peuvent être évités si le tuyau formé des deux parties cylindrique et conique, au lieu d'avoir un axe rectiligne, a un axe courbé en arc de cercle mobile autour d'un point fixe.

Dans ce cas, le tuyau dont il s'agit, au lieu d'avoir des sections circulaires, pourra avoir des sections rectangulaires dont les grands côtés seront perpendiculaires au plan de rotation alternative. Cela permettra d'obtenir de beaucoup plus grandes sections. On conçoit cependant que pour de petites profondeurs les côtés des sections rectangulaires parallèles au plan de rotation auront des limites assez restreintes.

Cette forme générale du système a permis, au moins pour un petit modèle, d'obtenir immédiatement le mouvement oscillatoire voulu sans aucun apprentissage. Une masse de plomb disposée sur le tuyau courbe en faisait une sorte de véritable pendule, qui réglait nécessairement le mouvement à saisir.

On conçoit que, même en conservant la première forme rectiligne de l'axe du tuyau, on peut, en le coordonnant avec une sorte de pendule attaché à l'axe du balancier, obtenir tout naturellement le mouvement alternatif voulu, sans

apprentissage. Mais dans l'un et l'autre cas ce mouvement de pendule, quelque facile qu'il soit de le régler, en fixant sa masse de plomb à une hauteur convenable, offre l'inconvénient suivant. Il faut que le tube ne puisse plus s'arrêter pendant un temps sensible, qui était celui du versement dans la première manœuvre décrite ci-dessus. Il est donc nécessaire alors que le sommet du tube s'élève plus haut que cela n'est indispensable ; de sorte que l'eau se verse sensiblement plus haut qu'on ne le veut pendant la fin de l'ascension du tube ou pendant le commencement de sa descente. Quant aux pompes en arc de cercle, il faut tenir compte de la manière dont l'air peut être enveloppé par la colonne ascendante.

Il vaut donc mieux en principe se servir du premier mode de manœuvre décrit ci-dessus, quand les circonstances le permettent et quand on peut facilement saisir le mouvement de mise en train.

Ce mouvement a été facilement saisi pour une pompe employant la force de deux hommes. Dans ce cas, l'axe rectiligne du tuyau était incliné ; les deux hommes agissaient par un système de manivelle grossièrement disposé avec des cordes, l'avantage de ce système consistant principalement dans sa rusticité.

Quand on a voulu agir sur une pompe verticale en planches, d'assez grande section pour employer une douzaine d'hommes, on a trouvé plus de difficultés à leur faire saisir tous ensemble le mouvement. On y est parvenu cependant ; mais il est douteux que pour ces grandes sections qui étaient des carrés, on doive recommander l'usage de ce système, quand d'ailleurs l'axe est vertical ; d'autant plus que si la profondeur d'eau à puiser n'est pas grande, il en résulte bientôt l'espèce d'étranglement annulaire occasionné par le fond de l'eau, ainsi que je l'ai signalé ci-dessus. Je vais donc me borner provisoirement à donner une idée des observations faites sur les appareils de petites sections élevant l'eau à des

hauteurs de $1^m,50$ à 3 mètres, en tenant compte des assertions d'un ouvrier intelligent, relativement aux détails de sa manœuvre.

C'est au commencement de chaque période que l'effort du moteur doit principalement agir. L'homme fait alors ce que les ouvriers appellent donner un coup *sec*. Cela ne signifie pas, dans leur langage, un coup brusque, mais un effort qui se fait vivement en appuyant sur le bras de levier opposé. Cela ne signifie pas non plus que cet effort doive seulement se faire pendant une faible partie de la course. L'ouvrier avait l'habitude de le faire sur plus de la moitié de cette course, soit sur les deux tiers environ, ce qu'il sera d'ailleurs facile de mieux préciser quand on se servira de ce système. On ne veut pas dire non plus qu'il ne doive pas se faire d'effort à la fin de la course, mais que cet effort doit être plus modéré, et aller, pour ainsi dire, ce que les ouvriers appellent *en mourant*. C'est-à-dire que l'homme, appuyant d'abord vivement sur le bras de levier, doit s'abandonner ensuite à son mouvement naturel jusqu'à la fin de chaque course ascensionnelle du tuyau mobile vertical, époque à laquelle il a un instant de repos instinctif, et est averti d'ailleurs, par le bruit de l'eau élevée qui se verse, du moment où il doit laisser retomber ce tuyau mobile vertical après ce versement.

Mais il ne faut pas qu'il abandonne le bras de levier, ni encore bien moins qu'il veuille faire un effort en sens contraire du premier. Le tuyau mobile devant retomber sans être aidé par l'homme, et celui-ci pouvant avoir une distraction, il faut recommander de poser la tête de manière à ne pas s'exposer à y recevoir un coup du bras de levier. Cela pourrait arriver à l'époque où ce dernier serait brusquement relevé, non seulement par le poids du tuyau (plus ou moins aidé par la pression de l'eau du puits sur la portion conique qui se vide en partie à son intérieur, en un mot par l'effet de l'oscillation descendante), mais serait imprudem-

ment accéléré par l'effort intempestif de l'ouvrier. Ainsi il est bien entendu que celui-ci ne doit pas faire d'effort pendant que le tuyau mobile redescend, et qu'il ne doit à aucune époque abandonner le bras de levier, s'il ne veut pas que la machine cesse d'être amorcée.

Quant à la raison pour laquelle son effort doit diminuer à la fin de l'ascension du tuyau mobile, il est facile de s'en rendre compte. A cette époque, le système achève de se remplir d'eau ascensionnelle ayant la propriété de pouvoir pousser le tuyau de bas en haut sous la partie conique, d'autant plus que celui-ci n'est plus retardé comme il tendait à l'être d'abord en vertu de la pression de l'eau du puits qui faisait sentir son action à l'extérieur sur la partie conique, à cause de la baisse de l'eau à son intérieur. Or, à l'époque dont il s'agit, cet intérieur est rempli d'eau en mouvement et qui, en vertu même de ce mouvement acquis de bas en haut, tend à passer en quelque sorte *à la filière* de la partie conique dans la partie cylindrique. On conçoit d'après cela que si l'on fait monter le tuyau mobile trop haut par un effort intempestif, c'est une raison pour qu'il cesse d'être amorcé, puisqu'il doit achever sa course ascensionnelle, en utilisant pour l'achever la force vive de l'ensemble du système.

Cependant il faut tenir compte de ce que l'ouvrier ayant nécessairement à la longue quelques distractions, cette ascension trop grande du tuyau aura quelquefois lieu. On en sera quitte pour amorcer de nouveau l'appareil, ce qui se fera ordinairement en trois périodes.

Pour éviter le jaillissement en dehors du réservoir annulaire destiné à recevoir l'eau élevée, on a disposé au dessus une sorte de toit conique fixe percé pour le passage de la corde B, afin de faire d'ailleurs diverger la colonne liquide. Mais, d'après ce qui vient d'être dit, quelques précautions sont nécessaires à cause de l'inconvénient résultant de ce que le tuyau mobile montera quelquefois plus haut qu'on ne le veut. Dans des circonstances où l'on s'est servi de cette pompe, on

a supprimé ce *toit* fixe et l'on y a substitué une surface concave attachée à la corde B. Cette disposition a le désavantage de faire verser l'eau plus haut que cela n'est nécessaire, cette surface ne pouvant pénétrer dans le bout de tuyau fixe. Elle est d'ailleurs commode quand on peut se contenter d'un rendement inférieur au maximum, parce qu'il s'agit quelquefois surtout des qualités spéciales de cette pompe.

Il m'a paru convenable de proposer la disposition suivante : on attache au-dessus du sommet du tuyau mobile une surface conique dont la pointe est tournée vers le bas, mais qui peut entrer dans le bout du tube fixe. Cette pièce a pour but de faire dévier convenablement la veine liquide, il paraît utile de disposer plusieurs surfaces coniques concentriques, de manière à produire un effet analogue à celui des lames concentriques, objet des expériences mentionnées pages 133 à 135. Cela aura d'ailleurs pour résultat d'empêcher de retomber dans le tuyau d'où elle sort un peu d'eau qui aurait pu y redescendre à la fin de l'ascension, surtout pour un assez grand diamètre. On conçoit d'ailleurs que l'on peut conserver le toit conique fixe, percé de manière à laisser passer au besoin le sommet du tuyau mobile, s'il montait trop haut par suite d'une fausse manœuvre.

Voici quelles sont les dimensions de l'appareil sur lequel on a fait le plus d'expériences. Le tuyau cylindrique a 13 centimètres de diamètre et 2 mètres de long. La partie évasée qui y est soudée a 36 centimètres de diamètre à son extrémité inférieure, et $2^{m},90$ de long. L'ensemble de ces deux tuyaux est en zinc n° 14. Mais la partie évasée a été renforcée par quatre cercles bordés de fils de fer, l'expérience ayant appris qu'une pompe de diamètres moindres, décrite ci-dessus, avait été, après un assez long usage, il est vrai, écrasée sur une certaine longueur de la partie évasée. A l'extrémité inférieure de ces divers modèles, on avait d'ailleurs roulé un fil de fer pour en augmenter la solidité. Cet appareil mobile pèse $22^{kil},7$; mais comme les cercles en zinc disposés sur la

partie conique forment de véritables petits flotteurs à cause de la manière dont ils sont attachés, l'ensemble ne se trouva point assez pesant pour redescendre de lui-même. On souda extérieurement à l'extrémité inférieure une feuille de plomb pesant 5^{kil},25, et qui lui donna le poids suffisant pour une marche régulière. La forme provisoire des cercles extérieurs précités est une petite cause de résistance dans l'eau du puits; mais la course du tuyau n'étant que d'une cinquantaine de centimètres, et chaque ascension durant environ une seconde, le choc de ces cercles contre l'eau extérieure ne se fait qu'avec d'assez petites vitesses.

Quant au bout du tuyau cylindrique fixe soudé au milieu du réservoir annulaire, et servant de guide au tuyau cylindrique mobile au sommet de celui-ci, son diamètre est de 15 centimètres, et sa longueur de 80 centimètres. Il y a bien assez de jeu entre ce tuyau fixe et ce tuyau mobile, même pour un essai très rustique, la corde attachée au sommet du tube mobile s'enroulant d'ailleurs alternativement sur un arc de cercle disposé à l'une des extrémités du levier. Je n'ai pas en ce moment ce modèle sous les yeux, mais l'ouvrier qui l'a construit en a conservé les dimensions et les poids.

Les diamètres dont je viens de parler en dernier lieu sont un peu trop grands pour un appareil manœuvré par un seul homme, élevant l'eau à des hauteurs de 2 à 3 mètres. L'ouvrier qui s'en est servi pense que pour une élévation d'environ 2^m, 20 les sections de la pompe mue par un homme doivent être moyennes entre celles de deux des modèles employés, l'un ayant un tuyau cylindrique de 13 centimètres, et le diamètre du tuyau cylindrique de l'autre étant de 9 3/4 centimètres.

Des expériences sur celle dont le tuyau cylindrique était de 13 centimètres de diamètre ont été faites pendant que j'étais en voyage. Les résultats de ces expériences furent malheureusement égarés avant mon retour, mais on m'assure qu'ils furent comparés à ceux d'une pompe ordinaire élevant

l'eau précisément dans les mêmes conditions d'un puits très voisin de celui sur lequel on opérait, et que, dans un même temps, ma pompe à tube mobile éleva plus d'eau que la pompe ordinaire, quoique celle-ci fût d'assez grandes dimensions. Ne l'ayant pas vérifié par moi-même, je ne mentionne ce résultat que pour valoir ce que de raison. On sait d'ailleurs combien la force de l'homme est variable et combien il peut y avoir de doute sur les résultats ainsi obtenus en eau élevée, quand on ne mesure pas les efforts du moteur au moyen de dynamomètres.

Mais il suffit que les quantités d'eau élevée aient paru satisfaisantes, pour que la rusticité de ce système mérite de fixer l'attention, notamment pour l'élévation des liquides imparfaits, tels que les purins de fumier. Ainsi on a remarqué que la pompe dont il s'agit élevait beaucoup de vase du fond d'un puits où elle était essayée.

Il est intéressant de donner une idée de la théorie de ce système. Quoiqu'il fût extrêmement délicat d'en donner une théorie complète, il est utile de fixer les idées sur les limites des dimensions indispensables pour chaque circonstance. Il faut d'abord tenir compte de ce que, si la hauteur à laquelle on veut élever l'eau était trop grande par rapport au diamètre de la partie cylindrique, il en résulterait des bouillonnements qui diminueraient l'effet utile.

Il faut aussi tenir compte de mes expériences plus générales sur les oscillations de l'eau dans les tubes verticaux. Quoique le cas ne soit pas tout à fait le même, l'effet de la force de l'homme devant être très différent de celui de l'eau d'un réservoir sur une des extrémités d'un tuyau de conduite fixe, mes recherches, exposées au commencement de la première partie de cet ouvrage, jetteront cependant beaucoup de jour sur ce sujet.

Ainsi, il en résulte que plus on veut élever l'eau à une grande hauteur, plus les diamètres du système doivent être augmentés si l'on veut conserver un rapport donné entre le

travail résistant en frottement et le travail moteur. Il est d'ailleurs évident que, si le diamètre de la partie cylindrique est augmenté, celui de l'extrémité inférieure de la partie conique doit être augmenté sensiblement dans le même rapport. Si, par exemple, le premier est doublé, le dernier doit être également doublé. On peut admettre, au moins provisoirement, dans la pratique, que pour une élévation double tous les diamètres doivent être doublés.

Cela suffit pour montrer que ce système ne peut élever l'eau qu'à des hauteurs médiocres, surtout s'il est manœuvré par un seul homme ; et que, si l'on veut s'en servir pour des hauteurs dépassant certaines limites, il vaudra mieux le faire par étages. On sait d'ailleurs combien, pour certaines circonstances, par exemple pour l'élévation des acides, on tiendrait à avoir une pompe sans piston ni soupape.

Il est facile de voir que dans la pompe conique, la durée de chaque période doit être, en général, à peu près proportionnelle à la racine carrée de la hauteur à laquelle on veut élever l'eau, si l'on adopte la disposition rectiligne verticale, toutes proportions convenablement gardées.

Il est intéressant d'étudier plus spécialement la manière dont l'eau se comporte dans l'intérieur et à la sortie de la partie évasée. Quand l'eau entre à l'extrémité inférieure, elle rencontre des parois vives, comme dans un ajutage d'une forme particulière étudiée par Borda ; mais la perte de force vive qui en résulte est bien atténuée par la diminution des vitesses résultant de l'évasement, le plus grand diamètre de celui-ci dépassant beaucoup celui de la partie cylindrique.

Quand l'eau sort dans l'oscillation descendante, le tuyau redescend en enveloppant plus ou moins, en poursuivant, si l'on peut s'exprimer ainsi, à son extrémité inférieure, le liquide qui en sort. La grandeur du diamètre inférieur rend d'ailleurs, sauf les considérations qui vont suivre, insignifiante la perte de force vive en ce point.

Je veux dire que la difficulté consiste bien plutôt à éviter

les pertes de travail provenant de ce que, dans sa descente, l'eau s'évase graduellement, il est vrai, dans la partie conique, mais enfin s'évase sans qu'il soit possible probablement d'éviter complètement la perte de force vive qui se manifeste plus ou moins dans les ajutages divergents,

Il est donc prudent, en général, de ne pas choisir un angle plus ouvert que celui de l'ajutage divergent de Venturi, quand les circonstances le permettent, et même de choisir un angle notablement plus aigu lorsque le puits est assez profond pour qu'on puisse, sans inconvénient, augmenter la longueur de la partie conique en conservant le même rapport entre les diamètres de ses deux extrémités, si ce rapport est celui que l'usage fait en définitive choisir comme le plus convenable.

J'ai fait en 1841 quelques expériences pour déterminer provisoirement, autant que possible, l'angle dont il s'agit. Voir la première partie, pages 145 et 146.

Je sais bien que dans l'un et l'autre cas les tourbillons provenant de la communication latérale du mouvement des liquides rendent la question très délicate; aussi, j'ai seulement voulu donner une idée d'un moyen d'étude qui m'a paru intéressant. Les essais directs du genre de ceux qui ont été faits pour les modèles de pompes coniques déjà employés, et qui pourront être multipliés, offrent évidemment le moyen le plus sûr d'éclaircir la question d'une manière plus complètement pratique. J'ajouterai seulement qu'il paraît utile que la partie conique soit toujours plongée dans l'eau à épuiser, si l'on veut que l'appareil marche le plus convenablement possible, cette partie devant se soulever en tendant à faire une sorte de vide entre elle et l'eau qui monte au-dessous du niveau de l'eau dans le puits. Il y a même lieu de penser qu'il vaut mieux que le sommet de cette partie conique ne s'élève pas tout à fait jusqu'à la hauteur de ce niveau.

Quant à un essai d'assimilation entre les phénomènes du

genre des colonnes oscillantes dont il s'agit, et ceux des colonnes liquides oscillantes dans des tuyaux de conduite débouchant dans des réservoirs, j'ai déjà donné ci-dessus une idée de l'utilité de ces considérations ; mais il est intéressant de faire pressentir la possibilité de s'en servir ultérieurement quand on connaîtra mieux la quantité de travail employé par l'ouvrier et ses variations, afin de déterminer par le calcul les dimensions les plus convenables pour le maximum d'effet, étant donnée la hauteur du versement.

On conçoit, en effet, que si la théorie donne des moyens pour déterminer, dans un appareil à colonne liquide oscillante et à tuyaux fixes, le rapport le plus convenable entre la masse d'eau qui doit être élevée à chaque oscillation, et le volume du tuyau vertical alternativement abandonné par la colonne liquide partant du repos, cela jettera beaucoup de jour sur cette question délicate. Il en sera ainsi surtout si l'on parvient facilement à faire fonctionner la pompe conique dont il s'agit, au moyen d'une machine à vapeur dont on pourra varier la puissance. J'ai seulement voulu par cette indication montrer comment des considérations, qui au premier aperçu semblent étrangères à la question, pourraient y être utilement appliquées.

Quoique les résultats des expériences les plus essentielles sur l'effet utile aient été égarés en mon absence, on peut jusqu'à un certain point s'en former une idée approximative au moyen d'un résultat que j'ai conservé, et qui est relatif au modèle dont le tuyau cylindrique a 9 3/4 centimètres de diamètre. L'eau se versait à $2^{m},16$ au-dessus du niveau de l'eau dans le puits; on élevait au moins 120 litres d'eau par minute. Mais ce modèle était, comme je l'ai dit, trop petit pour bien utiliser la force d'un homme, tandis que l'autre, dont le tuyau cylindrique avait 13 centimètres de diamètre, était trop grand. Le premier jetait donc nécessairement l'eau trop haut quand il était manœuvré par un homme : il ne serait pas juste de multiplier l'effet obtenu par le rapport du carré

du plus grand de ces diamètres au carré du plus petit, puisque d'ailleurs l'homme était fatigué par l'emploi du plus grand ; mais il paraît qu'on pourrait au moins proposer de prendre une moyenne. Je ne veux d'ailleurs que fixer mieux les idées sur ce genre d'effets, qui devront être étudiés d'une manière plus complète.

En principe, il est bon d'éviter de jeter l'eau à plus de 2 décimètres au-dessus du sommet du tube, ce qui fait d'ailleurs une hauteur moyenne de versement beaucoup moindre. Mais il est intéressant de remarquer que si cet appareil, pour un tube beaucoup plus court, est manœuvré de manière à faire principalement agir le moteur de haut en bas, on peut s'en servir, comme l'a remarqué un savant américain (qui n'avait peut-être pas connaissance de mes recherches sur ce sujet, puisqu'il ne les cite pas), afin d'obtenir des jets d'eau alternatifs, susceptibles d'être utilisés en horticulture pour l'arrosement des arbustes.

Ce genre d'effets n'est pas celui qui est l'objet essentiel sur lequel je dois spécialement attirer l'attention dans cette note. Tout le monde savait que si un entonnoir frappe l'eau d'un réservoir de haut en bas, il en résulte un jet d'eau en vertu du principe de la canne hydraulique. Mais si l'on tire cet entonnoir de bas en haut, la portion conique étant plongée et la partie cylindrique étant hors de l'eau en tout ou en partie, il en résulte une série de phénomènes intéressants, notamment dans les circonstances où l'on veut s'en servir pour élever à des hauteurs de $1^m,50$ à 3 mètres de l'eau ou des liquides imparfaits, des purins de fumier, ou des acides, etc.

Il y a un moyen de diminuer un peu les effets du bouillonnement de l'air signalés pour certaines hauteurs de versement. Par exemple, avec le premier modèle décrit ci-dessus, on a diminué l'angle de convergence du tuyau conique; mais cela n'a pas beaucoup diminué la division de l'eau, et il a fallu augmenter de moitié en sus environ la longueur de ce tuyau conique pour retrouver à sa partie inférieure une section

analogue à celle de la première série d'expériences. Cela n'a pas d'inconvénient quand le puits est assez profond au-dessous du niveau d'où l'eau doit être puisée. Pour de plus grands diamètres, l'eau est moins facilement divisée, à hauteur égale de versement.

Quant à l'application du système à l'élévation des purins de fumier, on peut demander si, le meilleur purin étant au fond de la fosse, cet appareil est convenablement disposé pour l'extraire.

J'ai déjà dit qu'il avait extrait de la vase du fond d'un puits; or, il est à remarquer que c'est précisément au fond de la fosse que l'appareil puise le liquide, et que même il le met en mouvement de manière à mêler jusqu'à un certain point le meilleur au moins bon, ce qui permettra d'arroser les fumiers d'une façon plus uniforme. Quant à l'augmentation de profondeur, qui peut être nécessaire autour de l'extrémité inférieure du tuyau conique, il est intéressant de remarquer que l'espèce particulière de succion développée par ce système offre elle-même un moyen de curage.

Pour l'arrosement des fumiers, il pourra être bon d'incliner la pompe conique, même quand son axe ne sera point un arc de cercle. La position du tuyau incliné oscillant a pu être convenablement maintenue au moyen de l'élasticité des cordages qui la retenaient de chaque côté. L'inclinaison du jet d'eau alternatif permet d'employer la vitesse acquise de l'eau pour l'arrosement des fumiers.

Il est intéressant de remarquer que cet appareil a l'avantage spécial de pouvoir être confectionné en quelques heures même avec des planches, quand les constructeurs manquent de pompes d'épuisement ou de vis d'Archimède, pour les épuisements temporaires, dans les limites où il peut être employé.

Quant à ce que j'ai dit sur la durée de chaque période pour des hauteurs données de versement, il est à peine nécessaire d'ajouter que pour une même machine, l'étendue de l'oscilla-

tion dépendant jusqu'à un certain point de la force avec laquelle elle est manœuvrée, cette durée n'est pas nécessairement la même si l'on emploie des hommes de forces différentes.

J'ajouterai donc, seulement afin de fixer les idées, que pour une pompe conique verticale dont le tuyau cylindrique avait 54 centimètres de diamètre et 60 centimètres de haut, le tuyau conique inférieur ayant 135 centimètres de côté et 1 mètre environ de diamètre à sa partie inférieure, la durée de la période était sensiblement d'une seconde, moitié à peu près de la durée trouvée pour un versement à une hauteur environ quadruple. Deux hommes saisissaient le mouvement avec facilité; l'effort se faisait pour cette petite hauteur de haut en bas.

Il est intéressant de rappeler ici une expérience que j'ai faite en 1840 et qui est mentionnée dans la première partie, page 207.

Un petit tuyau conique de ce genre, plongé dans un réservoir assez grand pour qu'il y eût des vagues, élevait de l'eau alternativement par le sommet d'un tuyau cylindrique soudé au tuyau conique de manière à former une petite pompe de ce système, soutenue sur l'eau par un flotteur oscillant verticalement avec les vagues.

Il ne faut pas oublier que pour les hauteurs de versement très petites, on est naturellement porté à faire l'effort de haut en bas.

Ce système a été mentionné favorablement en 1852 dans un rapport à la Société centrale d'Agriculture par M. Combes. qui l'avait vu fonctionner à Versailles. Un rapport favorable a été fait, en 1857, sur la même pompe à la Société centrale des architectes, dont plusieurs membres l'avaient aussi vu fonctionner.

M. Paris, architecte de la ville de Versailles, a certifié qu'il l'a *employée avec succès pendant une année environ.* « Elle éle-

« vait, dit-il, beaucoup d'eau à des hauteurs variant de 2 à « 3 mètres, et son jeu était très régulier ; mais telle qu'elle « avait été exécutée pour le cimetière du quartier Notre- « Dame de la ville, elle avait un inconvénient consistant en « ce qu'il fallait un apprentissage pour pouvoir s'en servir, « tandis que la pompe applicable à cette localité doit pou- « voir être manœuvrée indistinctement par toutes les per- « sonnes qui la fréquentent. »

J'ai indiqué ci-dessus des moyens d'éviter l'inconvénient dont il s'agit. J'ai cru devoir appeler spécialement l'attention sur cette pompe à cause des services qu'elle pourra rendre à raison de sa *rusticité*, et parce qu'il n'est jamais d'ailleurs sans intérêt de signaler des résultats singuliers qui semblent, au premier aperçu, contraires aux effets généralement connus d'appareils ayant en apparence une forme semblable.

Depuis que le Mémoire, qui vient d'être reproduit le plus textuellement possible, a été publié en 1867 dans le *Journal de mathématiques*. Cette pompe a été utilisée dans diverses circonstances sans que j'en aie été averti. Il y a même eu un concours régional où elle avait été présentée sous un autre nom que le mien. Je l'ai su par M. Beaume, ingénieur mécanicien, qui a eu l'obligeance de faire au jury une réclamation dont la justice a été reconnue et qui a été insérée dans le rapport.

M. Chemin a eu occasion d'employer cette pompe avec avantage. Elle a d'ailleurs longtemps fonctionné pour élever du petit lait dans une fromagerie, ayant l'avantage de ne pas en détériorer la qualité, de sorte qu'il servait ensuite à la nourriture des animaux. Elle y a été utilisée jusqu'à la fermeture de l'établissement de trappistes du département de la Mayenne où était cette fromagerie.

M. Chemin ayant eu l'occasion de montrer avec quelle rapidité elle pouvait être confectionnée à très peu de frais par les plus simples ouvriers, de manière à servir immédiatement, elle a été dernièrement l'objet de notices dans le *Jour-*

nal d'agriculture pratique et dans d'autres recueils. Je n'ai pas sous les yeux ces articles bienveillants. Je crois seulement me souvenir qu'on y a supposé plus grande qu'elle ne doit l'être en général, la course du tube vertical mobile. Ainsi que je l'ai rappelé ci-dessus, quand M. Combes et plusieurs ingénieurs ont fait manœuvrer la pompe, objet du rapport de M. Paris, la course n'était que d'une cinquantaine de centimètres.

Principes de plusieurs systèmes de pompes à colonnes liquides oscillantes et à flotteur.

Pompe sans piston ni soupape.

J'ai communiqué à la Société Philomathique de Paris, le 9 mai 1840, le principe de cette pompe. J'ai eu plus tard occasion de m'en servir pour amorcer mon moteur hydraulique à flotteur oscillant dont je donnerai plus loin la description; mais je n'avais pas fait alors mes expériences sur le moyen de diminuer la résistance de l'eau dans les coudes à angle droit brusque au moyen de lames concentriques, et je n'avais pas encore essayé pour ce genre de machines l'emploi des tuyaux en planches de grandes dimensions.

Cette pompe, telle que je m'en suis servi, se réduit à un tuyau vertical enfoncé en partie au-dessous du niveau de l'eau à épuiser, et recourbé à son extrémité inférieure de manière à déboucher à une certaine distance dans cette eau par une bouche évasée, à une profondeur convenable; sa forme générale est celle d'un grand L. Un flotteur, qui est la seule pièce mobile du système, met la colonne liquide en oscillation dans ce tuyau dont les extrémités sont toujours ouvertes, et à chaque période il se jette de l'eau au sommet du tuyau vertical. Ce flotteur, alternativement abandonné à

son propre poids, est alternativement soulevé par le moteur.

Il est à remarquer qu'à chaque période, le flotteur occupant une partie du sommet du tuyau vertical, de manière que le versement de l'eau élevée se fait autour de lui dans un espace annulaire, il résulte de cette circonstance du mouvement un véritable rétrécissement graduel, le flotteur étant inférieurement terminé en pointe; de sorte que cela augmente la hauteur à laquelle le versement peut se faire, mais aussi cela augmente la vitesse de l'eau à sa sortie.

Il résulte de la manière dont les sections sont modifiées par le flotteur une différence notable dans la durée des oscillations de la colonne liquide. Quand on supprime le flotteur, ces oscillations augmentent de durée, ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte au moyen de la théorie des oscillations de l'eau dans les tuyaux, exposée dans la première partie de cet ouvrage. Ainsi, pour le cas de cette expérience, la rapidité des oscillations était augmentée d'environ un sixième.

Quant à la profondeur du tuyau de conduite, on peut remarquer que ce tuyau pouvant être construit en bois, de façon à avoir une section rectangulaire dont le plus grand côté sera horizontal, cela diminuera cette profondeur. Dans ce cas, le flotteur aurait aussi une section rectangulaire. La seule partie de la construction qui puisse offrir quelque difficulté pour une application *rustique*, consiste dans les précautions à prendre pour que le flotteur n'éprouve point de percussions contre les parties fixes de l'appareil. Mais cela n'est point une difficulté sérieuse.

La mise en train est facile. On laisse le flotteur s'enfoncer à chaque période dans la colonne liquide descendante. La première fois qu'il descend, il trouve le liquide en repos, ce qui le fait monter autour de lui, en vertu de la résistance opposée par l'inertie du reste de l'eau contenue dans le tuyau de conduite. Cette première ascension est suivie d'une des-

cente sur laquelle on fait agir le flotteur par son poids, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'eau arrive au sommet du tuyau vertical. Alors l'appareil est en train. Il n'y a d'ailleurs rien de délicat dans cette manœuvre, l'instant de l'action alternative du flotteur n'étant pas précis, au moins pour un tuyau de conduite qui n'est pas trop court.

Cette pompe élevait l'eau à $1^m,50$ de haut, dans un tuyau de 40 centimètres de diamètre, au sommet duquel le versement se faisait à chaque période.

On peut réduire à très peu de chose la perte de travail en frottement au moyen de la grandeur du diamètre du tuyau fixe. La perte de force vive provenant de la vitesse de sortie alternative de l'eau à l'extrémité inférieure peut être bien atténuée au moyen d'un évasement assez graduel. On peut aussi augmenter la section du sommet par lequel doit se verser l'eau élevée. J'ai déjà indiqué dans cet ouvrage la différence des effets de ces deux genres d'évasement. (Voir pages 97 et 570.)

J'ai indiqué dans la première partie la méthode au moyen de laquelle on peut déterminer un angle convenable pour que la colonne liquide s'évase à son entrée dans le réservoir d'où elle part, sans qu'il y ait trop de force vive perdue. Les chiffres indiqués page 146 peuvent servir à donner une idée de ce genre d'effet. Il sera bon d'ailleurs de faire l'angle de convergence moindre que cela n'est indispensable.

Dans cet appareil, comme dans plusieurs autres de mon invention, la longueur du tuyau de conduite fixe est un obstacle à cause du prix qui en résulte. On pourra modérer cette longueur, en exagérant, comme je viens de l'indiquer, celle de la partie conique évasée, pour qu'il n'y ait pas de changement brusque de vitesse; et comme il n'y a point de passages plus ou moins étranglés par une soupape ou un tube mobile, puisqu'il n'y a d'autre pièce mobile qu'un flotteur, il ne paraît pas aussi utile que pour d'autres systèmes de mon invention de donner une grande longueur au tuyau de conduite.

Quoi qu'il en soit, cet appareil me semble destiné à résoudre le problème de l'élévation de l'eau à de très petites hauteurs, au moyen d'une pompe donnant un effet utile au moins aussi grand que celui des bonnes pompes pour les élévations à de grandes hauteurs, pourvu qu'on veuille faire la dépense d'un tuyau de dimensions convenables. On sait que la difficulté de ce problème a été souvent signalée par les plus savants hydrauliciens.

Si l'on veut élever de l'eau à des hauteurs médiocres, mais plus grandes par rapport à la course du flotteur, l'appareil, sans addition d'autres pièces mobiles, deviendra d'une construction un peu moins simple, mais plus intéressante.

Le flotteur fonctionnera alors dans la plus grosse branche d'un siphon renversé à branches de diamètres inégaux. L'introduction alternative d'une quantité d'eau à élever dans la masse liquide oscillante ne peut pas donner lieu à une perte de force vive bien importante, quand même elle tomberait par un orifice ordinaire de la hauteur du niveau de l'eau à épuiser sur le sommet variable de l'extrémité de la colonne dans la plus grosse branche, où l'on suppose au flotteur une course petite par rapport à la hauteur de versement de la branche d'un diamètre moindre. Mais cette perte peut même être bien atténuée au moyen d'une combinaison de niveaux dont le principe est analogue à ce qui se présente dans certaines ondes dites *solitaires*.

Il suffit de faire arriver l'eau dont il s'agit par un tuyau latéral d'une longueur convenable, débouchant par une extrémité dans l'eau à épuiser, et par l'autre dans le système au-dessous des niveaux variables de l'eau en oscillation. On prolongera les parois de la grosse branche au-dessus du niveau de l'eau à épuiser. Si les oscillations de la colonne liquide sont disposées de manière à s'élever alternativement dans cette branche au-dessus de ce niveau, on conçoit que la colonne liquide en mouvement dans le tuyau latéral peut être alternativement réduite au repos, à cause des pressions exercées

sur elle pendant qu'il y a de l'eau au-dessus de ce même niveau dans la même branche. L'avantage de cette disposition est de permettre d'employer utilement la force vive de la quantité d'eau qui entre périodiquement dans le système pour remplacer l'eau élevée.

Abstraction faite de l'utilité industrielle que peuvent avoir ces combinaisons, il est intéressant, au point de vue des principes du moins, de conserver la trace des moyens divers de faire entrer l'eau d'un réservoir dans une colonne liquide oscillante, le tuyau étant plongé en partie dans ce réservoir.

Je rappellerai donc que, dans la première partie, pages 158 et suivantes, planche 1, figure 5, j'ai décrit des expériences d'où il résulte que l'état d'oscillation d'une colonne liquide diminue la moyenne des pressions latérales sur un point donné des branches verticales, surtout dans certaines circonstances.

Au moyen de ce principe, l'eau à épuiser peut entrer latéralement dans le système, et en sortir par l'extrémité inférieure, sans qu'on soit obligé de la faire sortir comme ci-dessus par le sommet d'un tuyau.

Quant à ces applications aux moyens de faire entrer l'eau alternativement sans pièce mobile dans ces pompes à flotteur, l'expérience seule pourra décider la question pratique.

Mais ce procédé d'introduction et d'expulsion de l'eau à épuiser m'a paru mériter d'être signalé comme exemple d'application d'un des principes exclusivement dûs à mes recherches. Cependant, quant à la pratique , il est probable qu'un clapet d'introduction vaudra mieux; d'ailleurs il peut toujours être utile de signaler des moyens, non seulement nouveaux, mais qui semblent au premier aperçu contraires aux effets auxquels on s'attendait généralement.

Pompe à flotteur avec soupape, la détente étant alternativement produite par une colonne liquide oscillant sur une colonne d'air.

D'après des principes que j'ai depuis longtemps communiqués à la Société Philomathique, il est intéressant de considérer ce qui se présente pour diverses machines oscillantes, lorsque, dans le but de diminuer le chemin parcouru par les résistances passives à chaque période, on fait arriver une des extrémités d'une colonne liquide en oscillation dans un matelas d'air dont les dimensions règlent le chemin qu'il est nécessaire de parcourir pour éteindre le mouvement de cette colonne *sans choc brusque*.

Voyons donc ce qui arrivera dans la pompe oscillante, objet de la description précédente, où il y a un siphon renversé, lorsqu'on fera arriver ainsi sous un matelas d'air celle des extrémités de la colonne oscillante dans laquelle on n'entretient pas le mouvement immédiatement par l'action alternative d'un flotteur. Le chemin parcouru par la colonne liquide sera diminué, ce qui n'empêchera pas le matelas d'air de faire plus ou moins le vide en se détendant, par la raison même qu'il aura été comprimé plus fortement, en vertu de la continuation du jeu de la machine.

On conçoit donc qu'il y aura une époque à laquelle il se produira une succion qui pourra faire entrer dans le siphon renversé, par une soupape inférieure, de l'eau d'un réservoir à épuiser.

Une partie de l'eau contenue dans le siphon sera par suite versée au sommet du tube dans lequel joue le flotteur oscillant mis en action par le moteur. Il est évident qu'au bout de quelques périodes la continuation d'un effet analogue produit par l'action alternative du flotteur élèvera la colonne jusqu'au sommet et produira l'effet voulu, si l'appareil est bien disposé.

Un auteur allemand, je crois, dont je ne sais pas le nom,

avait proposé avant moi d'élever de l'eau par un principe semblable, mais avec cette différence essentielle que le tube d'ascension était *mobile*. Cet auteur utilisait le genre de mouvement qu'on cherche à éviter de donner aux baromètres dans la crainte de les briser.

L'appareil, tel qu'il l'avait disposé, pouvait marcher sans que son extrémité inférieure fût enfoncée dans l'eau à une profondeur bien notable. Dans l'appareil tel que je l'ai proposé, les tuyaux étant *fixes*, le moteur, si c'est un homme, peut être naturellement conduit par l'oscillation de la colonne liquide. Tandis que si le tube, et en un mot si tout l'appareil est *mobile*, il y a probablement à saisir, comme dans ma pompe conique quand un balancier avec une sorte de pendule n'y est pas joint, une sorte de *tour de main*, selon une expression reçue.

Depuis que j'ai présenté cet appareil à flotteur à la Société Philomathique, le 19 août 1843, un ingénieur qui ne connaissait pas ce qu'en dit le journal *l'Institut* l'a présenté de son côté. Mais il est le premier à convenir de ma priorité, et cette rencontre d'idées avec un homme distingué ne peut qu'attirer plus spécialement l'attention sur la combinaison dont il s'agit. Montgolfier avait signalé les effets d'une colonne d'air alternativement comprimée et dilatée; l'idée d'en faire le principe d'une pompe mue par un homme appartient à l'auteur allemand dans les limites indiquées ci-dessus. Je regrette vivement de ne pouvoir retrouver le nom de cet auteur dont m'avait parlé M. l'ingénieur en chef Frimot.

Pompe à flotteur aspirant au moyen d'un nouveau principe.

Ce système a été communiqué à la Société Philomathique le 19 novembre 1842.

Un tuyau courbé en arc de cercle et ouvert à une de ses extrémités, étant suspendu à un axe autour duquel il peut osciller librement, est plongé en partie, *à une petite profon-*

deur (par la portion inférieure de sa courbure), dans l'eau à épuiser. Dans la partie plongée, il est séparé en deux par une cloison près de laquelle est disposée une soupape ouvrant de dehors en dedans, et par laquelle doit être aspirée l'eau qui sortira par l'extrémité du tuyau qui est toujours ouverte.

Le mouvement de ce tuyau est réglé au moyen d'un flotteur qui donne lieu, comme on va voir, au jeu de cette espèce de pompe aspirante sans piston.

Il est clair que, si l'on soulève de l'eau dans le tube avec une vitesse suffisante, et que l'on diminue la vitesse du tube sans agir directement sur l'eau, celle-ci continuera à monter en vertu de sa vitesse relative, en produisant une aspiration; mais on n'agirait pas selon les vrais principes de la mécanique si l'on produisait cet effet par le moyen d'un obstacle extérieur.

Or, si un flotteur entraîné dans le mouvement du tube sort de l'eau à épuiser ou d'un réservoir particulier disposé à cet effet, à l'époque où l'on veut que le tube diminue de vitesse, on jouit de cet avantage que, pour y parvenir, on n'a à craindre aucune percussion entre des corps solides comme si l'on avait à considérer l'inertie d'un obstacle extérieur.

Lorsque le système est ramené en arrière par le mouvement oscillatoire que le moteur imprime, l'immersion du flotteur diminue la vitesse du tube sans agir aussi directement sur l'eau qu'il contient, et dont la force vive peut être en partie utilisée dans le balancement rétrograde dont l'effet reviendra en aide à l'effet direct pendant lequel se fait l'aspiration précitée, si le moteur n'agit que dans un sens.

On voit que l'idée de cet appareil consiste dans le mode d'action du flotteur, qui permet de produire l'effet voulu sans choc, malgré l'inertie des pièces mobiles, comme si l'on disposait de *forces immatérielles*. On voit aussi qu'il n'y a aucun effet de *canne hydraulique*, bien que la partie inférieure du tube ne soit enfoncée qu'à une très petite profondeur dans l'eau à épuiser.

S'il est difficile de prévoir quel peut être le degré d'utilité pratique de ce principe, il m'a semblé assez nouveau pour être signalé comme une des choses dont il est du moins intéressant de conserver la trace, il renferme d'ailleurs celui d'un nouveau *modérateur hydraulique* dont je parlerai ultérieurement.

Il y a des circonstances où il est utile de pouvoir amortir le mouvement acquis de grandes masses solides, sans éprouver aucun choc brusque. On peut y parvenir au moyen des freins hydrauliques, plus ou moins analogues à ceux que j'ai appliqués à l'écluse de l'Aubois. Mais cela est une cause de perte considérable de force vive. Or, si l'on emploie pour cela un flotteur alternativement émergé, les vitesses peuvent diminuer graduellement aussi, sans aucun choc brusque. Cependant il n'arrivera pas toujours, comme dans la pompe dont il s'agit, que le flotteur, en redescendant, puisse agir d'une manière utile. On conçoit que s'il fallait le détacher alternativement, il en résulterait une complication qui n'existe pas dans les freins hydrauliques précités.

En réunissant les principes de plusieurs pompes à flotteur, je ne recommande encore pour l'exécution que celle qui a été essayée *sans soupape* (voir p. 663 à 666). Quant à la modification indiquée p. 166, et qui a peu d'importance pour la pratique, il pourra être utile d'ajouter une soupape au tuyau d'introduction latérale. Le principe de la diminution des vitesses, avec lesquelles l'eau entrera, permettra encore de diminuer la perte de force vive par un bon emploi de l'inertie dans le mouvement alternatif; il en résultera d'ailleurs du frottement. Dans la pratique un clapet d'introduction latérale pourra suffire, même sans l'application de ce principe, ce qui permettra d'avoir moins de tuyaux.

EXPÉRIENCES

ET CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

SUR DES

MOTEURS HYDRAULIQUES NOUVEAUX

UTILISANT

L'ASPIRATION D'UNE COLONNE LIQUIDE

EN MOUVEMENT ALTERNATIF.

Moteur hydraulique à piston aspiré avec soupape annulaire.

Borgnis avait depuis longtemps proposé de transformer le bélier hydraulique élévatoire en moteur à mouvement alternatif, en recevant le coup de bélier au moyen d'un piston. Il ne paraît pas que cette disposition ait jamais été essayée.

Je ne trouve point qu'on ait proposé avant moi d'employer le principe du bélier aspirateur à faire fonctionner un piston. J'ai fait sur ce sujet diverses communications à la Société philomathique depuis le commencement de 1844, et je suis parvenu à construire un appareil sans soupape qui n'a plus aucune ressemblance avec le bélier.

Afin de faciliter les explications, je vais commencer par celui que j'ai présenté d'abord en 1844 et exécuté en 1847 pour la

Faculté des sciences de Besançon. Ce système a d'ailleurs aussi ses avantages. La soupape annulaire d'introduction de l'eau que j'ai employée est très différente de la soupape d'arrêt de Montgolfier qui fonctionnait en vertu de la percussion de l'eau. Cette dernière, d'après les dessins de cet illustre savant, ne différait pas d'une soupape d'arrêt de son bélier élévatoire. Elle devait intercepter alternativement la communication entre le corps de bélier et le *fond* d'un réservoir alimenté par le bief supérieur.

Je préfère, comme on peut le voir dans le Mémoire de M. Chemin, reproduit ci-dessus, disposer, pour un bélier aspirateur destiné seulement à faire des épuisements, la soupape d'arrêt dans *l'eau à épuiser*. Mais quant au moteur à piston dont il s'agit, j'avais prescrit pour un cas où le corps de pompe du piston était vertical, de mettre une soupape d'arrêt annulaire *au sommet* de l'appareil, et de la faire fonctionner en vertu d'un *phénomène de succion*.

Je donnerai plus loin la légende plus détaillée des figures 10, 11, 12, 13 et 14 de la planche VII qui ont pour objet ce piston P alternativement aspiré au moyen d'une soupape annulaire SS. Je vais d'abord exposer quelques principes. Je suppose qu'il fonctionne dans un corps de pompe EFGH au-dessus de cette soupape. Quand elle sera levée elle permettra à l'eau motrice d'entrer dans le système. Lorsqu'elle sera baissée, elle interceptera la communication entre l'appareil et le bief d'amont. Elle réunira le corps de pompe au tuyau de conduite inférieur, parce qu'elle viendra se poser sur son siège, en vertu d'un phénomène de succion sur lequel je reviendrai plus loin. Cette descente se fera à l'époque où la vitesse du liquide dans ce tuyau sera suffisante pour produire la succion précitée. Il est clair que le piston descendra par l'effet de la pression atmosphérique.

Lorsque la vitesse de la colonne liquide inférieure sera éteinte, le piston, si le corps de pompe est plongé au-dessous du niveau du bief d'amont, n'aura à vaincre, sauf les résis-

tances passives, pour revenir dans sa première position, qu'une pression égale à celle du poids d'une colonne d'eau d'une section de la même grandeur que la sienne, et d'une hauteur égale à celle de la chute motrice. On conçoit donc déjà qu'un ressort ou un flotteur ou un balancier à fourche et à contrepoids KL pourra le relever en temps utile et ainsi de suite indéfiniment.

Pendant que la colonne liquide inférieure est en mouvement, la soupape est appliquée sur son siège en vertu de la pression atmosphérique. Quand ce mouvement est éteint, il n'est pas même nécessaire, pour qu'elle se relève au moyen d'un balancier à contrepoids, qu'il y ait un mouvement en retour, comme dans le bélier aspirateur. Son sommet n'a, en effet, à vaincre pour commencer à se relever qu'une pression égale au poids d'une colonne liquide annulaire de même hauteur que l'eau du bief d'amont au-dessus de son anneau supérieur.

Le corps de pompe au lieu d'être vertical peut être horizontal. Cela permettra d'ailleurs, pour cette forme de l'appareil, ainsi que pour d'autres dont je donnerai ensuite la description, de fonctionner au besoin sous la glace. Dans l'un et l'autre cas il ne paraît pas indispensable d'ajouter aux pressions de l'eau un ressort ou une force quelconque extérieure pour faire revenir le piston en arrière. En effet, on pourrait disposer, soit derrière un piston horizontal, soit au-dessus d'un piston vertical, un tuyau, dont la partie inférieure serait assez au-dessous du niveau du bief d'aval, pour que le piston fût ramené convenablement en arrière en temps utile. Il refoulerait au besoin de l'eau dans un tube vertical suffisamment prolongé au-dessus du niveau du bief d'amont pour s'arrêter de lui-même sans aucune percussion. Si le tuyau est horizontal, on conçoit que derrière le piston il peut se relever verticalement, étant, bien entendu, ouvert à son sommet disposé de manière que l'eau d'amont ne puisse y entrer. Si le tuyau est vertical, le piston peut avoir au-dessus

de lui une petite colonne d'eau dans le cas où cela serait nécessaire.

J'attache peu d'importance à ces moyens de supprimer un ressort ou une autre force extérieure ayant pour but de ramener le piston en arrière. La profondeur à laquelle cette combinaison obligerait de disposer la course du piston pourraît offrir quelquefois des difficultés dans la pratique. Mais il m'a paru intéressant de conserver au moins la trace de cette simplification.

C'est avec une soupape annulaire que j'ai conçu d'abord mon nouveau moteur hydraulique à piston aspiré oscillant. C'est sous cette même forme qu'il a été employé pendant huit ans à des épuisements. Il faisait mouvoir une pompe jusqu'à l'époque où, dans la localité dont il s'agissait, l'eau à épuiser a été chargée de détritus qui ne pouvaient y entrer et qu'on est parvenu à faire enlever par une chaîne à godets.

Il faisait fonctionner une pompe aspirante avec réservoir d'air dilaté. Cette dernière pièce permettait de diminuer l'inertie des masses à mettre en mouvement alternatif. Le rendement avait été augmenté par la pose de ce réservoir.

Je préfère d'ailleurs aujourd'hui pour les épuisements le bélier aspirateur, tel qu'il a été décrit ci-dessus. Quant au moteur hydraulique à *piston aspiré*, je recommande en général une autre disposition pour laquelle il n'y a aucune espèce de soupape, quoique celle qui vient d'être décrite ait aussi ses avantages.

C'est sur l'appareil à soupape annulaire qu'on a fait le plus d'expériences. Ce système, indéfiniment abandonné à lui-même, a fonctionné sous des chutes motrices extrêmement variables, en faisant toujours marcher une même pompe élévatoire à réservoir d'air comprimé, plus ou moins vite, il est vrai, selon que la chute était plus ou moins grande. Celle-ci a varié de $3^{m},50$ à 1 mètre, à mesure que l'eau montait dans un des anciens bassins de Chaillot, où des expériences ont été faites sur plusieurs de mes appareils, seulement

d'ailleurs dans un but scientifique. On s'était servi, pour cette expérience, de matériaux qui étaient disponibles, mais dont on a eu besoin pour le service des eaux de Paris avant que les études aient été complètement terminées.

La pompe élévait l'eau à plus de 10 mètres au-dessus du niveau du bief supérieur. Les variations dans les hauteurs des niveaux de la chute motrice peuvent sans doute être encore bien plus grandes, sans que l'appareil s'arrête, et c'est peut-être le seul des moteurs hydrauliques essayés jusqu'à ce jour un peu en grand, qui soit dans ce cas. Le tuyau de conduite était formé de deux parties, la première en amont avait un diamètre de $0^m,13$, la seconde en aval un diamètre de $0^m,16$.

Le moteur hydraulique à piston alternativement aspiré sans soupape, dont je m'occuperai principalement dans ce chapitre, jouit de cette même propriété. Il a, outre l'avantage de la simplicité, celui de permettre d'obtenir au besoin des oscillations beaucoup plus rapides, n'ayant point à faire fonctionner de soupape dont on pourrait, d'ailleurs, craindre les trépidations. La théorie générale de ces deux genres d'appareils à piston alternativement aspiré, repose, comme on le verra plus loin, sur les mêmes principes. Il y a au reste quelques circonstances où l'appareil à soupape annulaire devrait être recommandé, son corps de pompe pouvant d'ailleurs être en entier hors de l'eau.

L'expérience a conduit relativement à cette soupape à un fait qui semble d'abord difficile à expliquer. Elle se ferme en vertu du principe qui fait descendre les poutrelles dans les barrages. Mais quand on n'emploie pas de *frein hydraulique* pour amortir la percussion sur son siège, le choc est bien plus violent qu'on ne devrait s'y attendre d'après ce qui s'est présenté dans d'autres applications de ce phénomène dont je parlerai plus loin. J'en ai déjà signalé une dans l'appareil de la figure 5, planche VII. Cela vient de ce que, en aval du piston, il tend à se faire, à cause de l'inertie de cette

pièce et des masses qu'il met en mouvement, un vide, bien autrement complet que dans l'appareil que je rappelle, où une colonne d'air est *seulement dilatée*. Aussi avant d'avoir trouvé le *frein hydraulique*, que j'ai appliqué à l'écluse de l'Aubois, j'étais embarrassé pour construire sur une grande échelle ce moteur hydraulique, à piston aspiré au moyen d'une soupape annulaire. Je ne laissais ouvrir celle-ci que d'une assez petite quantité, ce qui était une cause de perte de force vive. On est d'ailleurs entièrement débarrassé de ce genre de considérations pour le moteur hydraulique à piston aspiré sans soupape.

Principes d'un moteur hydraulique à piston creux.

Il y a une autre disposition avec soupape dont il est intéressant de conserver la trace, quoiqu'elle n'ait pas assez de simplicité pour être recommandée dans la pratique, du moins, avant d'avoir été étudiée par expérience. Je suppose qu'un piston, ne sortant jamais du corps de pompe, au lieu d'être plein, ait une soupape comme ceux auxquels on donne le nom de piston creux ; si, après l'avoir ouverte pour laisser l'eau du bief supérieur engendrer de la vitesse dans le tuyau de conduite, on la ferme par un moyen quelconque, il tendra à se produire un vide, comme je l'ai expliqué pour la forme précédente de l'appareil. Quand le piston aura achevé sa course, si, par un moyen quelconque, on ouvre la soupape dont il s'agit, il n'aura pas à refouler derrière lui une colonne d'eau au bief d'amont. Mais il aura à surmonter la résistance de l'eau qui le traversera.

On conçoit que pendant son mouvement de retour, l'eau du bief d'amont pourra imprimer de la vitesse à l'eau du tuyau de conduite. Le mouvement de retour du piston n'occasionnera donc aucune perte de temps. La durée de ce retour pourrait

même être réglée de manière que l'écoulement de l'eau motrice qui doit se faire à chaque période, eût le temps de se produire. Il en résulte que la soupape ou le système de soupapes se fermera et s'ouvrira assez facilement sans doute au moyen de pièces fixes disposées, à cet effet, à chacune des extrémités de sa course.

Pour compléter la description de ces appareils à piston aspiré, il serait intéressant de conserver la trace de celui dont il s'agit, quand même il ne serait pas employé. Il y aurait à ajouter quelques détails sur la disposition de la soupape, qui paraît la plus convenable pour ce piston creux. Je reviendrai ultérieurement sur ce sujet dans un chapitre sur les roues hydrauliques, à l'occasion des roues à pistons et à soupapes tournantes d'Armstrong. Mais je dois dire que le système précédent de soupape annulaire, séparé du piston, me semble préférable, d'autant plus que le *piston creux* occasionnera une autre espèce de perte de force vive, en offrant un passage plus resserré.

Moteur hydraulique à piston plein, n'ayant qu'une seule pièce mobile.

Je donnerai plus loin la légende plus détaillée des figures 7, 8 et 9 de la planche VII. Je vais d'abord exposer quelques principes. Ces figures, depuis longtemps dessinées, ont seulement pour but de représenter, sans être à l'échelle, le tuyau tel qu'il avait été exécuté pour un cabinet de physique. Il est à peine nécessaire d'ajouter que l'évasement en CD devrait être bien différent, d'après les principes exposés dans la première partie de cet ouvrage.

Au lieu d'employer une soupape annulaire pour introduire l'eau motrice dans le tuyau de conduite, et au lieu d'employer pour le même objet le piston à soupape dont je viens de parler, on peut ouvrir et fermer alternativement l'orifice

d'entrée au moyen d'un piston *plein*. Il est clair que la plupart des effets précités se présenteront dans ce système.

Il sera toujours convenable que l'inertie du piston et des masses quelconques qu'il doit mettre en mouvement alternatif soit la moindre possible. Pour faire entrer le piston, dans les modèles que j'ai exécutés, il suffit de se servir de l'espèce particulière de succion résultant du mouvement du liquide entre le piston P et la bouche AB du tuyau. Un ressort ou un balancier à contrepoids relevait le piston quand la vitesse de la colonne liquide aspirante était éteinte. Il n'est pas nécessaire pour cela de profiter d'une oscillation en retour qu'il vaut mieux éviter. En effet, il n'y a à vaincre pour commencer à revenir en arrière qu'une pression hydrostatique résultant de la hauteur de la chute motrice. Il faut de plus tenir compte des résistances passives occasionnées par ce mouvement en retour. Un ressort est préférable à un balancier à contrepoids quand cela est possible, pour obtenir le recul dont il s'agit, afin de diminuer l'inertie des pièces à mouvoir alternativement.

On pourrait aussi employer un flotteur ayant peu de masse par rapport à celle d'un contrepoids. On aurait, il est vrai, à vaincre la résistance provenant de son mouvement dans l'eau. L'inertie du liquide déplacé ne paraît pas en général être bien importante pour cette application. L'appareil n'ayant plus alors qu'une seule pièce mobile, même sans aucun ressort, puisque le flotteur pourrait être attaché à la tige du piston, cela réduirait le système à une simplicité qui mérite d'être signalée.

Les propriétés essentielles de ces divers pistons, aspirés en vertu du mouvement acquis d'une colonne liquide, sont très différentes de ce qui se présentait dans les anciennes machines à colonne d'eau de Westgarth, où le piston était en partie sollicité par l'aspiration *purement hydrostatique* d'une colonne liquide. Au moyen d'une chute d'eau motrice très variable, on peut, comme je l'ai dit pour l'appareil à soupape

annulaire, vaincre dans certaines conditions une même résistance, sans qu'il s'arrête, parce qu'on laisse écouler plus ou moins d'eau.

Je suppose que le niveau d'aval ait des variations considérables. Il suffira de laisser écouler plus ou moins d'eau afin de déterminer la force de succion nécessaire pour faire entrer le piston dans le tuyau ou pour que la soupape annulaire se ferme, si l'on en emploie une. Dans le cas où c'est le niveau d'amont qui est variable, on conçoit qu'il faut aussi plus ou moins d'eau pour engendrer une vitesse donnée. Dans l'une et l'autre hypothèse, il est bien intéressant de remarquer que s'il faut sensiblement arriver à une vitesse déterminée pour faire fonctionner l'obturateur alternatif, il en résulte qu'une même quantité de force vive est emmagasinée dans le tuyau de conduite.

La succion provenant de la vitesse acquise de la colonne liquide pourra donc être la même pour des chutes motrices très variables. Mais à cause de cette variation on voit immédiatement, quant à celle du bief d'amont, que la pression ajoutée par l'eau de ce bief peut différer beaucoup. Si c'est le niveau d'aval qui change, la force de l'aspiration sera modifiée de la manière suivante. Au premier instant, s'il se fait un vide au-dessous du piston, la pression atmosphérique agira d'abord comme dans le cas où il n'y aurait pas de variation du niveau précité. Mais on conçoit qu'une même résistance à vaincre pourra parcourir un chemin plus ou moins long à chaque période, selon que les différences de hauteur de ce niveau auront été plus ou moins grandes. C'est le cas qui s'est présenté à Chaillot pour l'expérience précitée avec soupape annulaire. Le niveau d'amont y était sensiblement constant. Si le tuyau de conduite et la tige du piston sont horizontaux, les mêmes principes peuvent être appliqués. C'est en définitive le niveau du bief supérieur qui peut changer notablement l'effort du piston, celui du bief d'aval pouvant modifier sa course. Pour que la machine ne s'arrête

pas quand le niveau d'amont varie, la résistance à vaincre doit être moindre que celle qui peut résulter du maximum de hauteur du niveau d'amont, il est convenable que le chemin parcouru par cette résistance puisse être assez grand pour utiliser le travail que chaque période rend disponible.

Pour tous ces appareils il est bien entendu que l'extrémité débouchant dans le bief inférieur doit être graduellement évasée, d'après les considérations présentées dans la première partie de cet ouvrage.

Il faut tenir compte de ce que ces appareils à pistons aspirés ne sont pas en général, à proprement parler, des machines à colonne liquide oscillante, ce qui permet de débiter beaucoup plus d'eau que dans le cas où il y aurait une grande oscillation en retour. Pour l'appareil à *soupape annulaire*, il y a bien un mouvement en arrière sous le piston, mais il n'y en a pas qui soit indispensable dans la colonne liquide. Il n'y en a pas non plus pour cette colonne dans l'appareil à *piston creux*. Mais il y en a un qu'on ne peut éviter dans l'appareil à piston plein. De sorte que, malgré l'extrême simplicité de ce dernier, c'est une raison de plus pour que les autres aient aussi leurs avantages.

Il est intéressant de remarquer pour ce piston une propriété analogue à celle de la succion en vertu de laquelle la soupape annulaire précitée se ferme. Quand le piston a bouché une certaine partie de l'orifice du tuyau de conduite, il résulte de son inertie et de celle des masses qu'il fait mouvoir, que le vide, qui tend à se produire au-dessous de lui, peut se faire bien plus vivement sentir que le phénomène de l'enfoncement des poutrelles dans les barrages. Mais cet effet n'occasionne pas ici, comme pour la soupape annulaire, une percussion entre corps solides exigeant certaines précautions.

Dans les deux systèmes de piston aspiré que j'ai exécutés, il n'est pas d'ailleurs nécessaire que le piston n'ait point de soupape. Il vaut même mieux, à cause des chances de ren-

contre avec la colonne liquide aspirante, qu'il puisse au besoin livrer passage au liquide. On peut donc en employer un du système Letestu. Il ne s'agit au reste, relativement à cette condition, que d'éviter les inconvénients d'une percussion éventuelle. Il suffirait à la rigueur, pour obvier à ces inconvénients, de se servir de l'ancien piston d'Agricola. Il était composé d'un cône de cuir plus ou moins flexible. Le piston Letestu est, comme on sait, disposé sur un grillage conique, de manière à pouvoir rester *décousu*, afin de faire plus complètement fonction de soupape (1).

(1) J'ai indiqué ci-dessus un moyen de faire revenir en arrière le piston de l'appareil à soupape annulaire, sans employer pour cela une force extérieure telle qu'un ressort ou même un flotteur distinct du piston. On peut demander s'il serait possible de faire revenir en arrière le piston sans soupape par un moyen semblable. Je suppose que son corps de pompe soit vertical et descende assez profondément au-dessous du niveau du bief inférieur, je suppose aussi qu'un flotteur cylindrique vertical, terminé inférieurement par un cône, soit assez long pour s'élever toujours au-dessus du niveau du bief supérieur, quoiqu'il entre alternativement comme un piston dans ce corps de pompe vertical. On sait qu'il y a des pistons cylindriques frottant seulement contre un anneau convenablement garni.

Dans le cas où son extrémité inférieure descendrait assez au-dessous du niveau du bief d'aval, l'eau de celui-ci tendrait par sa pression à le relever. Or, si son poids est réglé convenablement, on conçoit que cela pourra suffire pour le faire sortir du corps de pompe, en quelque sorte comme une bombe chassée par un mortier. Quand il en sera sorti, la pression de l'eau du bief d'amont le poussera d'abord avec plus de force de bas en haut. Mais bientôt le liquide aura un mouvement en sens contraire, il en résultera un effet de succion qui le fera rentrer dans le corps de pompe où il viendra comme la première fois, et ainsi de suite indéfiniment.

Je ne parle de cette combinaison, sans entrer dans d'autres détails, que pour compléter l'exposition des principes. Je préfère la disposition précitée du piston aspiré alternativement sans soupape. Quant à l'espèce de *flèche oscillante*, dont je viens de parler, je ne m'en occuperai pas dans les considérations théoriques. J'ajouterai seulement, pour tous ces pistons aspirés, qu'il n'est pas nécessaire, comme on pourrait le croire au premier aperçu, de les accrocher au haut de leur course, si, pour redescendre, ils ont une certaine résistance à vaincre.

Je passe à la légende des deux systèmes de pistons aspirés, dont on a exécuté en 1847 des modèles fonctionnants pour la Faculté des sciences de Besançon, sur la bienveillante indication de M. Regnault. M. Tresca a fait aussi exécuter en 1867,pour le Conservatoire des arts et métiers, un modèle fonctionnant de mon piston aspiré sans soupape. (Voir pl. VII, fig. 7, 8 et 9).

NN niveau du bief supérieur NN', niveau du bief inférieur, ABCD tuyau fixe, P piston conique hors du tuyau, P' même piston à sa position inférieure, R ressort à boudin soutenant l'appareil mobile auquel s'attache la résistance à vaincre, des fers de scie, par exemple.

Dans l'état représenté par la figure 7, la vanne V de la figure 9 étant levée convenablement, l'eau s'écoule jusqu'à ce qu'il se produise une force de succion suffisante pour faire entrer le piston P dans le tuyau fixe ABCD. Alors la colonne liquide contenue dans le tuyau agit par succion sur le piston P, en vertu de sa vitesse acquise; quand cette vitesse est éteinte, le piston a pris sa position P', figure 8, le ressort R relève ce piston à sa première position et ainsi de suite indéfiniment; il suffit pour la mise en train de déboucher une première fois le tuyau ABCD.

Dans les modèles construits pour les cabinets de physique, le piston marche très bien ainsi au moyen d'un ressort ou d'un balancier à contrepoids. Mais, pour une exécution sur une grande échelle, il serait en général utile de disposer les choses de manière que le piston n'eût d'abord à vaincre qu'une résistance suffisante pour régler convenablement l'introduction de l'eau et n'eût à saisir la résistance *totale* qu'à partir de l'instant où, étant entré dans le tuyau, il reçoit complètement l'action de la pression atmosphérique.

On conçoit que, sans aucune complication relative à la condition dont il s'agit, il y a des travaux qui permettent immédiatement d'y avoir égard. Une scie, par exemple, choisie dans ces figures pour faire comprendre un mode d'application

du moteur, peut ne commencer à agir qu'à partir de l'instant où le piston est entré dans le corps de pompe. On conçoit d'ailleurs que, si un ressort est de force assez variable, les choses peuvent être disposées de manière que, s'il n'y avait pas de résistance à vaincre, le piston fût réduit au repos à l'instant où il rejoindrait la surface de la colonne liquide aspirante réduite au repos elle-même. Le ressort pourrait donc travailler ensuite utilement dans le sens opposé. On pourrait même, dans de bonnes conditions, faire travailler le piston dans les deux sens. Cependant, comme il faut un certain temps pour l'entrée de l'eau motrice, on n'a pas encore essayé de transformer le mouvement alternatif en circulaire au moyen d'une bielle, ce qui pourrait quelquefois être utile.

On n'a pas à s'occuper, quant à l'appareil à soupape annulaire, de diviser la résistance en deux parties pour un même sens du mouvement, et c'est une raison de plus pour conserver la trace de ce dernier, quoi qu'il soit moins simple, ayant d'ailleurs ses avantages. Son corps de pompe peut être disposé entièrement au-dessus de l'eau, ce qui ne serait pas possible pour le piston aspiré sans soupape. Voici la légende des figures 10, 11, 12, 13 et 14 relatives à cette disposition.

N N niveau de l'eau du bief supérieur, N′ N′ niveau de l'eau du bief inférieur. Cet appareil a le même but que le moteur à piston aspiré sans soupape. On a donc cru inutile de représenter la scie ou autre machine qu'il fait mouvoir, A B C D tuyau fixe, E F G H corps de pompe, P piston au haut de sa course, P′, même piston au bas de sa course, S S soupape Cornwall baissée dans la figure 10, levée dans la figure 11, K L balancier à fourche et à contrepoids.

S S étant levée, l'eau s'écoule jusqu'à ce que la succion fasse retomber cette soupape sur son siège A B, ensuite le piston descend en P′ en agissant sur la résistance à vaincre. Quand le mouvement de la colonne d'eau contenue dans le tuyau A B C D est éteint, S S n'est plus suffisamment appuyée sur ses sièges, en vertu de la pression atmosphérique

en T T, le contrepoids L la relève et ainsi de suite indéfiniment. On a varié à volonté, même dans le premier modèle, le nombre des pulsations régulières de 12 à 22 par minute. Ce nombre peut être bien autrement grand pour le piston sans soupape, comme je l'ai constaté en 1870 avec M. Félix de la Lande, ingénieur des mines. La soupape S S étant plus ou moins ouverte, plus ou moins chargée, permet de varier facilement le nombre des périodes et les quantités d'eau débitées, mieux peut-être que l'appareil à piston aspiré sans soupape.

Le balancier à fourche de la figure 12 peut être disposé, comme on le voit figure 13, avec des arcs de cercles, afin que la levée puisse se faire verticalement. On a substitué, figure 14, à la soupape de Cornwall un bout de tuyau mobile reposant alternativement sur un siège à sa partie inférieure. Le sommet de cette pièce est attaché à un manchon de cuir qui intercepte à ce sommet le passage de l'eau, étant attaché lui-même par sa partie supérieure au corps de pompe. Ce manchon flexible est assez long pour se plier facilement eu égard à la course du bout de tube mobile et se déplier ensuite en s'appuyant contre ce corps de pompe d'un diamètre moindre que le bout de tuyau formant cette espèce particulière de soupape.

Il est intéressant d'ajouter quelques détails sur les modes d'actions mutuelles du piston et de la colonne liquide aspirante, dans ces divers genres de machines. Je suppose que le vide fût complet sous le piston. Il s'agit de voir comment, pour le maximum d'effet, on devrait régler la résistance à vaincre d'une manière utile, relativement au poids d'une colonne d'eau de section égale à celle du piston, qui ferait équilibre à la pression atmosphérique. On supposera, dans tous les cas, l'inertie de la colonne liquide contenue dans le tuyau de conduite, très grande par rapport à celle du piston et des masses solides ou liquides, qui doivent être mises en mouvement en même temps que lui. Si la résistance qu'il

s'agit de déterminer était assez considérable par rapport au poids de la colonne liquide dont je viens de parler, qui serait capable de faire équilibre à la pression atmosphérique, la vitesse du piston serait très petite, et la colonne d'eau aspirante aurait le temps de revenir en arrière et de le repousser de bas en haut; c'est ce qui est arrivé dans une machine précitée à soupape, qui a été longtemps employée utilement.

Si au contraire la résistance était constamment très petite, par rapport au poids de cette colonne fictive, le piston marchant avec une vitesse accélérée rejoindrait la colonne liquide et la suivrait dans son mouvement. A partir de l'époque où celle-ci serait rejointe, il n'y aurait plus de raison pour qu'il survînt une solution de continuité jusqu'à ce que les vitesses fussent éteintes. Les choses se passeraient jusqu'à un certain point, comme si l'atmosphère n'existant pas, on y substituait, à l'extrémité d'aval, un grand réservoir ayant la hauteur nécessaire pour remplacer la pression atmosphérique, et comme si, à l'extrémité d'amont, on remplaçait le piston par un grand réservoir ayant la hauteur nécessaire pour remplacer ce qui resterait, dans l'hypothèse précédente, de la pression atmosphérique, en partie contrebalancée par les résistances à vaincre.

Je suppose d'abord que le piston reste immobile et que la colonne liquide en mouvement fasse derrière lui le vide le plus complet possible. Dans cette hypothèse, le chemin parcouru par cette colonne sera le moindre possible, ce qui sera un avantage relativement au travail en résistances passives. La combinaison qui doit conduire au maximum de rendement est, d'après cela, celle qui permettra au piston de rejoindre l'eau aspirante à l'instant où cette eau et le piston arriveront en même temps au repos. Cela dépend de la manière dont les résistances à vaincre doivent être combinées. Si, par exemple, quand le mouvement du piston est accéléré, on lui fait saisir sans percussion une seconde cause de résistance, cette condition pourra être facilement remplie.

D'après ces considérations, dans ce genre d'appareils, on trouvera sans doute une application du *modérateur* hydraulique indiqué ci-dessus page 671. Avant l'époque où le piston doit ralentir sa course, un flotteur entièrement plongé peut ne faire sentir qu'une résistance insignifiante, à l'exception de celle éprouvée par tout corps plongé qui se meut dans un réservoir. Or, si à partir de l'instant où l'on veut ralentir la vitesse du piston, le flotteur sort de l'eau, il agira sans aucune percussion entre corps solides, pour diminuer graduellement la vitesse du piston, ainsi que je l'ai indiqué ci-dessus. On pourrait, il est vrai, y substituer un ressort, mais cela n'est pas nécessaire, si l'inertie de la longue colonne liquide aspirante est assez grande. Dans l'un et l'autre cas, les efforts employés à ralentir le mouvement serviront ensuite à faire revenir le piston en arrière, à l'époque où son retour à sa première position devra s'effectuer, et il pourra même travailler pendant ce retour.

Outre les pièces solides sur lesquelles ce double effet doit se produire, il faut tenir compte d'une colonne liquide variable, dans le corps de pompe. Elle suit ou précède le piston. S'il n'y a pas de soupape, cette colonne le suit; s'il y en a une, elle le précède, et même, en général, il y en a une qui le suit. On voit qu'en supposant même qu'il n'y eût pas de résistances passives, la vitesse du piston ne serait pas uniformément accélérée, jusqu'à l'époque où elle doit se ralentir.

En donnant une très petite course au *piston sans soupape*, parce qu'on ne tenait pas au rendement, mais seulement à un moyen simple d'avoir des oscillations extrêmement rapides, en 1870, il a été facile d'obtenir avec régularité au moins quatre périodes par seconde, dans des conditions sur lequelles je reviendrai. Mais en général, d'après les expériences faites pour les cas où l'on tient au rendement, il paraît qu'une dizaine de périodes par minute est un nombre assez convenable dans beaucoup de circonstances.

Le mouvement acquis d'une colonne liquide permet ainsi, par divers moyens, de produire des effets analogues à ceux d'une chute motrice beaucoup plus grande qui serait employée à faire fonctionner le moteur hydraulique à piston, connu sous le nom de machine à colonne d'eau. Il faut tenir compte, il est vrai, des résistances passives de l'eau dont l'écoulement alternatif engendre la force vive qui permet d'obtenir une pression motrice bien plus grande que celle qui proviendrait de la pression hydrostatique directement causée par une petite chute d'eau. On voit, d'après cela, qu'il est convenable que le tuyau de conduite ait un diamètre assez notable pour que les *hauteurs dues* aux vitesses soient en général faibles par rapport à la chute motrice.

Cependant on peut, en évasant convenablement la bouche de sortie au bief d'aval, d'après les principes exposés dans cet ouvrage, donner à l'eau d'assez grandes vitesses dans le tuyau de conduite sans qu'il en résulte beaucoup de perte de force vive, sauf la *contraction* à l'entrée du liquide dans le système par un orifice annulaire. Sous ce rapport, il y a lieu de penser que le piston oscillant sans soupape aura un avantage particulier, en permettant de mieux disposer l'orifice d'entrée du liquide.

Ces appareils peuvent débiter beaucoup d'eau par un tuyau de conduite d'un diamètre médiocre. Ainsi, ils sont jusqu'à un certain point à la machine à colonne d'eau ce que les turbines sont aux anciennes roues hydrauliques à *augets* ou de *côté*, et aux roues hydrauliques à pistons d'Armstrong. Je ne proposerai cependant pas, du moins avant qu'on ne l'ait essayé, de transformer leur mouvement alternatif en circulaire au moyen d'une bielle, les turbines paraissant d'ailleurs plus simples lorsqu'on n'a pas besoin d'obtenir un mouvement alternatif.

Considérations théoriques sur le maximum de rendement des systèmes précédents.

Influence de la longueur du tuyau de conduite.

Je vais considérer un cas général, spécialement intéressant pour les deux moteurs hydrauliques à piston aspiré, qui ont été exécutés, ainsi que je viens de le dire. Les principes que je vais exposer seront utiles pour la théorie de divers autres appareils, et même pour celle des béliers hydrauliques élévatoires ou aspirateurs de Montgolfier.

On peut admettre qu'avec une chute motrice constante, la quantité d'eau nécessaire pour engendrer une vitesse donnée dans un tuyau de conduite assez long, d'un diamètre déterminé, sera à peu près proportionnelle, toutes choses égales d'ailleurs, à la longueur développée de ce tuyau, dans les limites de vitesse dont on aura à s'occuper pour ce genre d'appareils. On sait d'avance que les hauteurs dues à ces vitesses doivent toujours être beaucoup moindres que la hauteur de chute, à cause des résistances passives; il est bien entendu qu'il ne s'agit dans cette hypothèse que des limites dont on peut avoir besoin pour rassurer par le calcul sur la longueur qu'il suffira de donner au tuyau de conduite.

On peut admettre que le travail employé pour chaque changement de période soit le même, quelle que puisse être la longueur du tuyau de conduite, si l'on convient qu'à chaque période, la vitesse à l'instant où la communication est interrompue avec le bief inférieur soit une quantité donnée. En effet, il est rationnel de supposer que les phénomènes de succion d'où résulte, dans les expériences précitées, chaque changement de période, étant de la même nature, il doit en être ainsi. D'après ces hypothèses, le rapport du travail employé pour chaque changement de période à la quantité

d'eau descendue dans une même période, sera évidemment en raison inverse de cette quantité d'eau.

Les résistances passives supposées proportionnelles aux carrés des vitesses de l'eau se composent de deux parties. Les unes sont des résistances locales. Ainsi les quantités de vitesses perdues à la sortie du tuyau n'augmentent pas avec sa longueur, si l'on peut admettre dans des limites assez étendues que leur maximum étant une quantité donnée, leurs moyennes ne soient pas très différentes, quelle que soit la longueur du tuyau. Dans cette supposition, la partie du déchet provenant de ce genre de perte de force vive ne doit pas servir à la recherche de la longueur du tuyau d'un diamètre donné, qui conduit au maximum de rendement. En effet, on pourra admettre en moyenne que la quantité de déchet provenant de cette cause sera proportionnelle au volume d'eau descendue, qui sera lui-même, par hypothèse, en raison de la longueur du tuyau.

Mais le frottement augmente avec cette longueur. Il résulte d'ailleurs des considérations et des expériences décrites dans cet ouvrage que les coefficients de ce frottement dépendent, plus qu'on ne le croyait, de la longueur dont il s'agit, quand elle ne dépasse pas certaines limites par rapport au diamètre. On supposera cependant provisoirement que le frottement lui soit proportionnel, sauf à tenir ensuite compte des différences pouvant provenir de ce que je viens de rappeler. J'admettrai donc que, si le travail employé pour chaque changement de période est en raison inverse de la longueur du tuyau, le travail en frottement perdu à chaque période sera en raison directe de cette même longueur. Or, on peut appliquer ici une règle démontrée pages 480 et suivantes, sur laquelle j'aurai d'ailleurs occasion de revenir. Dans ces conditions, on sait d'avance que, pour ce genre d'appareils, il faut donner au tuyau de conduite une longueur assez notable. On trouve qu'il faut, d'après le calcul précité dont il s'agit, choisir celle-ci de manière que le travail en frottement de l'eau,

s'écoulant de l'amont à l'aval comme on vient de l'expliquer, soit assez sensiblement égal pour chaque période, du moins, dans des limites d'une certaine étendue, à celui qui est employé au changement de cette période; il faut d'ailleurs tenir compte, pour l'application de cette règle, des considérations présentées pages 481 et 482.

Pour les appareils à piston aspiré, il faut examiner si la course du piston ne doit pas contribuer au calcul dont il s'agit.

Le corps de pompe peut être horizontal ou vertical. Il suffit, pour donner une idée convenable de ces effets, relativement à ce calcul, de supposer le tuyau de conduite horizontal et d'un diamètre assez petit. Il s'agit de pouvoir négliger provisoirement le résultat de la dénivellation ou de l'écrasement de l'extrémité de la colonne liquide en mouvement derrière le piston pendant que se fait le vide. On n'aurait pas à s'occuper d'une dénivellation de ce genre pour un corps de pompe vertical, mais il est commode de pouvoir provisoirement supposer le travail employé à faire le vide, proportionnel à la course de la colonne liquide derrière le piston.

Si l'on admet que celui-ci soit disposé de manière à utiliser complètement ce vide, son chemin, d'après ces hypothèses, sera proportionnel à la quantité d'eau dépensée pendant la période dont il s'agit. Dans le cas où une même résistance passive doit être vaincue par le piston, la course de celui-ci ne doit donc pas entrer dans le calcul de la longueur du tuyau de conduite donnant le maximum d'effet.

Il est bien entendu qu'il ne s'agit que d'avoir une idée approximative de la marche des résultats, d'autant plus que les résistances passives quelconques empêchent les carrés des vitesses de l'eau, d'augmenter pendant chaque période en raison des quantités d'eau descendues au bief d'aval. D'après ce que j'ai expliqué pages 481 et 482, il est facile de voir dans quel sens cela modifie les calculs, qui supposent d'ailleurs, le tuyau de conduite assez long relativement à la hauteur de

chute et en général d'un diamètre assez grand par rapport à sa longueur.

Ces considérations théoriques seront suffisantes pour établir les bases des calculs dans la pratique. Il en résulte, conformément aux principes exposés aux pages précitées, que, pour ces hypothèses, les longueurs des tuyaux de conduite peuvent varier dans des limites assez étendues, sans qu'il en résulte de trop grandes différences de rendement.

Il resterait à examiner, relativement à ce qui concerne le piston, les effets du mouvement de l'eau alternativement contenue dans son corps de pompe. Mais les résistances passives qui en résultent (si leur travail n'est pas proportionnel à la course du piston, ce qui rentrerait dans les considérations précédentes), seront en général très peu de chose, pour l'appareil à soupape annulaire, par rapport aux autres causes de déchet. Il faudra en effet que la quantité d'eau descendue à chaque période au bief d'aval soit généralement assez grande pour produire une puissante aspiration. Quant au piston aspiré sans soupape, il est clair que la vitesse avec laquelle il sera relevé ou ramené en arrière (étant, il est vrai, suivi par toute la colonne d'eau contenue dans le tuyau de conduite) sera en général peu de chose relativement à la vitesse engendrée dans l'autre sens pour produire le travail de l'aspiration. Comme il ne s'agit d'ailleurs ici que de donner une idée des considérations sur la recherche des conditions du maximum de rendement, au moyen de phénomènes encore peu connues, je n'entrerai pas dans d'autres détails relativement à d'autres formes du système qui n'ont pas encore été exécutées.

Examen des quantités d'eau les plus convenables pour un appareil de dimensions données.

Au moyen d'un appareil de dimensions données, on peut, avec une même chute, varier le débit de l'eau motrice dans des limites très étendues. Il s'agit maintenant de voir comment on peut se rendre compte des conditions qui conduisent alors au maximum de rendement. Cela n'est pas aussi facile que pour le cas qui vient d'être examiné, où, par hypothèse, la vitesse maximum obtenue à chaque période était là même à peu près, quelle que fût la longueur du tuyau de conduite dont il s'agissait de déterminer les dimensions. Dans ce cas, en effet, on pouvait admettre que le travail nécessaire, pour obtenir chaque changement de période, était assez sensiblement indépendant de la longueur de ce tuyau.

Ici, l'on convient que c'est un appareil de dimensions déterminées dont on varie le débit. Or, je suppose que chaque changement de période soit obtenu, comme il l'a été dans les appareils tels qu'ils ont été exécutés, au moyen de phénomènes de succion encore peu connus et occasionnant des étranglements graduels alternatifs. On peut demander si la perte de force vive, à chaque changement de période, pour une chute d'une hauteur donnée, serait proportionnelle au carré de la vitesse finale, dans le cas où l'on serait obligé de régler un contrepoids ou la force qui en tient lieu, de manière que la course de la soupape ou du piston hors du corps de pompe fût indépendante de la quantité d'eau motrice descendue à chaque période. Mais, au lieu de régler ainsi le débit, on peut y parvenir, dans des limites assez étendues, en augmentant plus ou moins la course dont il s'agit, l'expérience ayant appris que la force de succion diminue, toutes choses égales d'ailleurs, quand cette course augmente, sans que le contrepoids soit modifié. Le calcul de la perte de

force vive est compliqué par les variations que peut avoir la durée de l'époque pendant laquelle se fait la fermeture, en supposant toutes choses égales d'ailleurs, puisque la durée de l'étranglement variable ne sera pas la même dans tous les cas. Je reviendrai plus loin sur ces difficultés.

Comme il s'agit surtout ici de donner une idée de la marche des effets, je supposerai d'abord qu'au lieu d'employer la force de succion précitée, on se serve d'autres moyens connus pour faire alternativement ouvrir et fermer l'orifice d'introduction de l'eau. On pourrait alors admettre provisoirement que le travail nécessaire pour opérer chaque changement de période serait assez sensiblement indépendant de la quantité d'eau motrice qui serait descendue pour chacune d'elles. S'il en était ainsi, ce travail serait en raison inverse de la quantité d'eau descendue à chaque période. Si, par exemple, cette quantité était double, le travail dont il s'agit serait moitié moindre par rapport à l'unité de masse descendue.

Je vais considérer maintenant les résistances passives supposées proportionnelles aux carrés des vitesses qu'il faudrait vaincre pour conserver les vitesses de l'eau dans le tuyau de conduite comme si ces résistances n'existaient pas. Elles seraient approximativement par hypothèse en raison de la quantité d'eau descendue à chaque période, les carrés des vitesses étant proportionnels à ces quantités. Mais le chemin parcouru étant aussi en raison inverse de celles-ci, le travail en résistances passives, à chaque période, serait comme le carré de ces mêmes quantités d'eau. Si, par exemple, le volume d'eau descendu à chaque période était double, le rapport de ce travail en résistances passives à celui de l'eau descendue serait double ; tandis que le rapport du travail employé pour opérer le changement de période, dans l'hypothèse précitée, au travail de l'eau descendue serait moitié moindre. Il faut remarquer, comme je l'ai fait ci-dessus, que les résistances passives diminuant elles-mêmes les vitesses,

la marche des résultats dont je viens de parler n'est pas exacte et ne peut être considérée comme l'étant suffisamment, pour le genre de calcul dont il s'agit, que dans des limites d'ailleurs assez étendues.

Il faut considérer aussi, comme pour la détermination de la longueur du tuyau, des résistances passives résultant du mouvement du piston. Nous supposerons qu'il n'y a à vaincre qu'une résistance déterminée pour chaque appareil et qu'on aura seulement à considérer la différence des chemins parcourus en raison de la quantité d'eau descendue à chaque période. Dans ces conditions, on pourra admettre que le travail en résistances passives, provenant du frottement du piston, sera assez sensiblement proportionnel à la quantité d'eau descendue à chaque période. De sorte qu'il n'entrera pas dans le calcul des conditions du maximum de rendement provenant des variations dans la quantité descendue pendant cette même période.

Il reste à examiner, comme pour l'autre cas précité, les effets du mouvement de l'eau qui remplit alternativement le corps de pompe. Ils ont, comme je l'ai dit, peu d'importance en général, par rapport aux autres causes de déchet. Cependant, pour le cas dont il s'agit, on peut admettre que les carrés des vitesses de cette eau varieront proportionnellement à ce qui aurait lieu si la vitesse du piston était accélérée dans les limites indiquées ci-dessus.

Quant au piston sans soupape, on pourra admettre que son mouvement de retour en arrière, ainsi que celui de toute la colonne d'eau qui le suit, aura une vitesse accélérée pendant qu'il sera dans le corps de pompe. J'ai expliqué ci-dessus que les vitesses, augmentées d'abord pendant la descente d'un piston vertical, doivent ensuite diminuer au moyen d'une disposition particulière pour éviter une percussion entre le piston et la colonne liquide aspirante. On voit, d'après cela, de quelle manière il faut comprendre que les carrés des vitesses doivent être considérés comme proportionnels à ce qui

se présenterait dans un mouvement accéléré. Je veux seulement indiquer comment on peut avoir un moyen de considérer la manière dont varient les diverses vitesses relativement aux hypothèses ci-dessus énoncées.

Ces dernières considérations sont d'ailleurs secondaires. L'essentiel est de montrer que l'appareil, ayant des dimensions déterminées, on peut admettre que toutes les causes de déchet, je veux dire celles qui résultent seulement du mouvement de l'eau pendant l'écoulement en aval, abstraction faite de ce qui se présente pour chaque changement de période, sont proportionnelles aux carrés des vitesses. De sorte que ce n'est plus seulement du frottement de l'eau qu'on a à s'occuper, comme pour la détermination de la longueur du tuyau, afin d'obtenir les conditions du maximum de rendement, il faut y réunir toutes ces résistances proportionnelles aux carrés des vitesses de l'eau.

Il en résulte que le travail de toutes ces résistances (dans les limites que je viens d'expliquer pendant l'écoulement de l'eau en aval), par rapport au travail de l'eau descendue à chaque période, augmente proportionnellement à cette quantité d'eau, tandis que, dans l'hypothèse ci-dessus énoncée, le travail employé pour opérer chaque changement de période serait en raison inverse. On serait donc conduit, au moyen du système de calcul employé pour déterminer la longueur du tuyau de conduite, à conclure que les quantités d'eau descendues à chaque période devraient occasionner un travail total en résistances passives supposées proportionnelles aux carrés des vitesses et résultant seulement de l'écoulement de l'eau avant qu'une soupape ou un piston l'ait interrompu, sensiblement égal à celui qui est nécessaire pour opérer chaque changement de période. Il faudrait d'ailleurs tenir compte des limites dans lesquelles cette règle peut être assez convenablement appliquée, d'après les considérations que j'ai présentées pages 480 et 481.

Ainsi que je l'ai expliqué ci-dessus, l'hypothèse, d'après laquelle le travail employé pour opérer chaque changement de période serait indépendant de la quantité d'eau descendue à chaque période paraît loin d'être exacte, cette quantité de travail pouvant être modifiée par diverses considérations précitées. Mais en se rendant compte de la raison des choses, on voit que, en général, plus le travail dont il s'agit est grand, toutes les conditions étant égales d'ailleurs, plus il faut, afin d'obtenir le maximum de rendement, que les vitesses soient considérables pour une même chute motrice dans un appareil de dimensions déterminées. Il est clair que, si ce travail était très petit, ce seraient de très petites vitesses qui conduiraient au maximum de rendement.

Si, dans l'état actuel de nos connaissances, on ne peut pas préciser la quantité de travail employée à opérer chaque changement de période, on voit quelle est la marche à suivre pour modifier la règle qui résulterait de l'hypothèse précitée, quand les phénomènes dont il s'agit seront mieux connus.

CONCLUSIONS.

Après avoir présenté diverses applications des principes de l'aspiration d'une colonne liquide en mouvement, j'ai donné la description de plusieurs moteurs hydrauliques utilisant d'une autre manière des principes analogues, en évitant aussi les percussions. Afin de faciliter l'exposition, j'ai commencé par celui qui paraît ressembler au bélier aspirateur, quoiqu'il en diffère essentiellement.

La soupape d'arrêt du bélier aspirateur de Montgolfier est la même que celle de son bélier élévatoire. Elle fonctionne en vertu de la *percussion* de l'eau étant disposée au fond d'un réservoir. La soupape dont je me suis servi pour cet appareil est annulaire et fonctionne, en vertu d'un phénomène de

succion, autour d'un corps de pompe. Quand celui-ci est vertical, elle peut être disposée au sommet du système, figure 10.

Ces corps de pompe peuvent d'ailleurs être horizontaux de manière à faciliter la marche de l'appareil sous la glace. Il n'est pas nécessaire d'employer ce que Montgolfier appelle oscillation en retour.

On peut au reste varier les formes du système ayant des corps de pompe verticaux ou horizontaux. Dans celle que je signale le plus spécialement, *il n'y a qu'une seule pièce mobile indispensable.* C'est un piston ayant un mouvement alternatif sans soupape, il fonctionne au moyen de la succion d'une veine liquide. Cet appareil ne ressemble pas au bélier aspirateur et il est réduit à la plus grande simplicité que puisse avoir, pour diverses applications, un moteur hydraulique à mouvement alternatif sans choc.

J'ai présenté ensuite des considérations qui peuvent aussi être utiles pour la théorie des béliers hydrauliques, elles permettent de déterminer les bases des calculs des dimensions et des débits qui, dans des circonstances données, conduisent au maximum de rendement. Lorsque les conditions changent, on peut toujours calculer le déchet résultant du frottement et des autres causes de perte de force vive provenant de l'écoulement de l'eau par le tuyau de conduite, pièce principale de ces systèmes. J'ai donné dans la première partie de cet ouvrage des moyens de faire ce calcul approximativement, je reviendrai encore sur ce sujet en décrivant d'autres appareils de mon invention.

Ces appareils à *piston aspiré* jouissent de l'avantage spécial de pouvoir fonctionner entièrement abandonnés à eux-mêmes avec une chute motrice très variable, ayant toujours à vaincre cependant une même résistance au moyen du mouvement acquis d'une colonne liquide. Le principe permet d'obtenir une pression motrice bien plus grande que la pression hydrostatique d'une colonne d'eau dont la hauteur serait seulement égale à celle d'une petite chute, en débitant au besoin

beaucoup d'eau avec un tuyau d'un assez petit diamètre. Il est bien entendu qu'il conviendra en général que le diamètre soit assez grand, car si l'on peut se procurer des pressions considérables en laissant écouler beaucoup d'eau, cela ne pourra se faire qu'en perdant du travail en résistances passives pendant la descente du liquide de l'amont à l'aval. Il est d'ailleurs bien à remarquer que le chemin du piston sera généralement petit par rapport à celui de l'eau motrice, tandis qu'il n'en était pas ainsi dans les machines dites à *colonne d'eau*. Dans celles-ci, il est vrai, le *corps de pompe* du piston était notablement plus large que le tuyau de conduite. Mais si les figures précitées ont eu surtout pour but de représenter, sans être à l'échelle, les appareils tels qu'ils ont été exécutés, je dois faire observer que les *corps de pompes* pourraient avoir des sections plus grandes relativement à celles du tuyau de conduite. J'ai indiqué dans la première partie de cet ouvrage les limites dans lesquelles les élargissements de ce genre n'absorbent pas trop de force vive.

Depuis que la page 687 est imprimée, j'ai retrouvé une note sur le piston sans soupape annulaire. Le nombre de périodes obtenues à Versailles en 1870, avec une marche régulière, a dépassé 240 par minute. L'appareil a marché longtemps, de sorte qu'on est sûr du résultat. Le nombre de périodes en un temps donné pouvait varier dans des limites très étendues, quand on changeait la course du piston, qui était très petite pour la limite supérieure dont je viens de parler. Cet appareil peut aussi être considéré comme une sorte de *compteur* à cause de la manière dont le débit varie dans diverses conditions. La hauteur de la chute motrice était, autant que je peux m'en souvenir, d'environ un mètre.

APPAREIL A OSCILLATIONS

D'UNE PROFONDEUR INDÉFINIE

SANS RETOUR VERS LE BIEF D'AMONT

Ainsi que je l'ai dit, pages 605 et 640, j'avais signalé, dès le début de mes études sur l'hydraulique, des moyens de faire des épuisements à une profondeur quelconque, en vertu du mouvement acquis d'une colonne liquide. Je vais donner la description de mes premiers appareils, qui ont d'ailleurs été le point de départ des recherches objet de cet ouvrage.

Abandonné à moi-même dans une province reculée, j'étudiai les débris d'un ancien cabinet de physique, mais ce qui restait de la bibliothèque des ingénieurs de Caligny fut pour moi une cause de difficultés singulières. De leur temps, l'art des constructions était très avancé. On sait qu'ils ont eux-mêmes, contribué à ses progrès. Il n'en était pas ainsi de la science des machines hydrauliques, et l'on comprend difficilement, aujourd'hui, la réputation du grand ouvrage de Bélidor.

J'étudiai, en 1831, le phénomène de l'oscillation de l'eau dans un tube vertical enfoncé en partie dans un réservoir (1)

(1) Mes premières recherches sont mentionnées dans une lettre de M. l'abbé Delamarre, depuis archevêque d'Auch, pliée de manière à conserver le timbre de la poste du 1er janvier 1832.

et peu de temps après le moyen d'amorcer un siphon par cette colonne oscillante. Ces faits n'étaient pas inconnus. Mais ils n'étaient pas enseignés dans les cours d'hydraulique. Heureusement les ingénieurs auxquels je les communiquai ne les connaissaient pas, cela m'encouragea à entreprendre de longues études à la suite desquelles j'inventai, en 1834, le système dont je vais parler. J'ai déjà mentionné des expériences que j'ai faites en 1833 (Voir pages 72 et suivantes de la première partie et 525 de la seconde partie).

J'avais été frappé d'une idée de Montesquieu. Le moyen le plus sûr d'établir la paix entre les peuples, était, selon lui, de favoriser le commerce, et cela me donna la pensée de m'occuper des écluses de navigation. Je voulus essayer de perfectionner le système des bassins d'épargne étagés, décrits dans Bélidor.

Je pensai à me servir des oscillations de l'eau dans un tuyau de conduite pour essayer de distribuer l'eau d'une manière plus avantageuse dans ses bassins, au moyen de plusieurs branchements verticaux, successivement débouchés et communiquant en temps utile avec chacun de ces bassins. Je m'aperçus en mars 1834 qu'il n'était pas nécessaire de laisser tomber au bief d'aval ce qui restait d'eau dans chaque tube vertical à la fin de chaque oscillation ascendante au-dessous du bassin avec lequel il était en relation; mais qu'on pouvait, au moyen d'un tuyau de communication avec un réservoir inférieur, profiter d'une oscillation descendante pour faire vider le tuyau vertical bien au dessous du niveau de décharge. De sorte qu'il n'y aurait pas de perte de force vive dans cette opération, s'il n'y avait pas de résistances passives.

Cette idée contenait un principe essentiel. Cependant je n'y attachai d'abord qu'une importance secondaire. Mais je m'aperçus bientôt qu'au moyen de plusieurs oscillations successives on pourrait, s'il n'y avait pas de résistances passives, élever l'eau à une hauteur indéfinie même sans rétrécir le

tube vertical, en faisant descendre celui-ci à une profondeur suffisante dans un puits.

Je suppose qu'une soupape mette alternativement en communication, à une profondeur donnée, le tuyau vertical avec celui d'arrivée et celui de décharge et que la communication soit d'abord interrompue avec le bief inférieur. Si cette soupape l'établit avec ce bief, en l'interrompant avec celui d'amont, il se produira, abstraction faite des résistances passives, une oscillation descendante qui fera baisser l'eau au-dessous du niveau du bief d'aval, à une profondeur égale à la hauteur de chute. Si l'on rétablit les choses dans leur premier état, l'eau montera au-dessus du niveau du bief d'amont à une hauteur double de celle de la chute. Quand on remettra ensuite la soupape dans sa position précédente, l'oscillation descendante fera baisser l'eau au-dessous du niveau d'aval à une profondeur égale au triple de la hauteur de chute.

Si l'on continue la même manœuvre, on élèvera l'eau au-dessus du niveau d'amont au quadruple de la hauteur de chute. Puis l'oscillation descendante fera baisser l'eau plus bas que la précédente et ainsi de suite indéfiniment. De sorte qu'on pourra faire descendre l'oscillation jusqu'à la profondeur quelconque où l'on aura mis la soupape et par conséquent élever l'eau à une hauteur indéfinie, si cette profondeur est elle-même indéfinie. A chaque période on augmentera d'une hauteur égale à deux fois celle de la chute, l'élévation du sommet de la colonne liquide.

Ce fut seulement après avoir inventé cette combinaison que je m'aperçus qu'il était possible de trouver des choses plus nouvelles que je ne l'espérais, en combinant les oscillations de l'eau, même dans un tuyau de conduite de diamètre égal partout.

Au lieu d'employer ces oscillations à élever de l'eau au-dessus du niveau d'amont, je vis qu'on pouvait s'en servir pour tirer de l'eau d'une profondeur quelconque au moyen

d'une seconde soupape permettant à l'eau d'un puits d'entrer dans le système quand la colonne liquide était descendue assez profondément. Il est bien entendu que ces hauteurs et ces profondeurs sont limitées par les résistances passives. Mais l'essentiel était de bien signaler un principe scientifique nouveau, en montrant qu'on pouvait *accumuler* des oscillations, augmentant en théorie comme les termes d'une progression arithmétique, jusqu'à l'époque où l'appareil était complètement amorcé. A partir de cet instant, les oscillations successives devaient conserver sensiblement les mêmes amplitudes en élevant de l'eau ou en faisant des épuisements.

Cet appareil a fonctionné au Jardin des Plantes en 1839 en présence de la commission du Prix de mécanique de l'Académie des sciences. Cette commission était composée de MM. Poncelet, Coriolis, Gambey et Séguier.

La soupape qui fut employée sur le tuyau de conduite, dont j'ai donné la description, pages 49 et suivantes de la première partie, est représentée planche VIII, figure 15. Soit A un réservoir recevant l'eau d'amont. Il communique avec un tuyau de conduite CE dont l'extrémité EF se relève verticalement. Dans l'état représenté par la figure, ce tuyau est isolé par la soupape E du tuyau EB qui débouche dans le bief inférieur. Quand cette soupape est horizontale, et occupe la place indiquée par la ligne ponctuée, la communication est interrompue entre le tube EF et le bief d'amont, elle est établie entre ce tube et le bief d'aval. J'ai expliqué ci-dessus comment on amorce l'appareil. Je suppose donc le tube EF vidé jusqu'à un niveau très peu au-dessus de la soupape E, alors dans la position horizontale. Si elle est remise verticale l'eau monte en vertu des lois de l'oscillation jusqu'en F. Arrivée en ce dernier point au-dessus du niveau AA′ à une hauteur A′F moindre que A′E, l'eau se verse pendant un certain temps dans un bassin F′G jusqu'à ce que sa vitesse ascensionnelle soit éteinte. Quand la colonne liquide est réduite au repos, la soupape E est tournée, comme le repré-

sente la ligne ponctuée, de manière à refermer l'issue de communication avec le tuyau d'amont EC, elle établit la communication entre le tube vertical EF et le tuyau d'aval EB. Alors la colonne liquide contenue en EF fait une oscillation descendante pendant laquelle le tuyau EB verse l'eau de cette colonne au bief inférieur B, dont le niveau est au-dessous de celui AA′ du bief supérieur d'une hauteur A′B′. S'il n'y avait pas de résistances passives, le centre de gravité de la colonne liquide EF ne descendrait pas, c'est-à-dire qu'un volume égal à celui de cette colonne se transporterait en B, dont le niveau est supposé à la hauteur de ce centre de gravité.

La hauteur du point F au-dessus du bief inférieur est, bien entendu, déterminée de manière à être plus grande que la hauteur du niveau de ce bief, au-dessus du point de départ de la colonne liquide ascendante afin de tenir compte des résistances passives. Le versement en B rétablit l'appareil dans le même état qu'avait la première ascension. De sorte que le jeu recommence ainsi de suite indéfiniment, pourvu que la soupape soit convenablement manœuvrée.

M. Savary, qui avait assisté à l'expérience précitée, fit construire un modèle de cette machine pour le cabinet de l'Ecole polytechnique et en donna la description dans son cours de mécanique à cette Ecole. Dans ce modèle il n'y a qu'un seul tube d'ascension comme dans la figure 15 ; on va voir qu'en général il en faut deux.

Cet appareil est moins simple qu'un autre de mon invention déjà mentionné dans la première partie de cet ouvrage page 318. *Mais il a des propriétés toutes spéciales et notamment de ne point permettre à la colonne liquide de revenir en arrière.* Si donc les longueurs des tuyaux de conduite d'amont et d'aval sont bien combinées, deux têtes de machine peuvent être disposées sur un seul tuyau de conduite divisé en deux parties, de manière que la colonne liquide ne s'arrête jamais sensiblement, l'eau s'élevant dans un des tubes verticaux à l'époque où elle descend dans l'autre.

Il y a un instant extrêmement court pendant lequel l'eau est en repos dans le tuyau de conduite d'amont et celui d'aval. On en profite pour changer les communications entre chacun des deux tubes d'ascension et chacune des parties précitées du tuyau de conduite. On ne doit pas se dissimuler qu'il y a une difficulté pratique, à cause de la rapidité avec laquelle doit se faire le changement des communications. Quand il n'y a qu'une seule tête de machine, il est moins difficile de faire fonctionner la soupape lorsque le tuyau de conduite a d'assez grandes longueurs en amont et en aval. L'inertie de l'eau qu'il contient dans ses deux parties donne du temps pour effectuer cette manœuvre.

Mais s'il y a deux tubes d'ascension, dont l'un doit être plein quand l'autre achève de se vider, il faut que le changement précité de communication se fasse de manière que les deux tubes verticaux ne puissent pas permettre au liquide contenu dans l'un deux, de pénétrer dans l'autre. En effet, par la raison même que les parties d'amont et d'aval du tuyau de conduite auraient une grande longueur, l'inertie de leur colonne liquide donnerait à l'eau contenue dans l'un des tubes, le temps d'entrer assez dans l'autre pour diminuer considérablement la profondeur du point de départ de l'oscillation dans celui-ci, ce qui changerait l'état de la question.

S'il est indispensable que ces deux tubes soient un instant bouchés, on conçoit qu'il y a une chance de coup de bélier exigeant certaines précautions. Or, c'est ce que je veux éviter dans les divers appareils que je recommande pour la pratique. Cependant, quoique je préfère en général un autre de mes systèmes d'appareils élévatoires, dont je parlerai plus loin, je crois utile d'appeler l'attention sur celui dont il s'agit, quand ce ne serait qu'au point de vue des principes sur lesquels il repose et qui ont d'autres applications.

Une seule pièce mobile peut suffire pour établir et interrompre les communications entre les deux tubes verticaux et

les tuyaux d'amont et d'aval. Voir planche VIII, figure 16. Les choses peuvent être disposées de manière qu'en lâchant des déclics en temps utile, soit au moyen d'une partie de l'eau élevée, soit au moyen de deux flotteurs abandonnés alternativement par la colonne descendante de chacun des deux tuyaux d'ascension, cette pièce tourne d'elle-même d'une quantité convenable, en vertu de la pression du liquide contenu dans celui des tubes verticaux qui est plein. Il suffit qu'une sorte de piston reçoive sur une de ses faces la pression de l'eau de celui des tubes verticaux qui est plein, pendant que son autre face ne rencontre que la pression de l'eau qui reste dans l'autre tube vertical. Quand ce sera ce dernier qui sera plein, il suffira de lâcher un déclic pour que la soupape soit remise dans la première position en vertu du même principe.

Sauf quelques circonstances exceptionnelles, je n'attache qu'une importance secondaire, quant à la pratique, à cette disposition moins facile à exécuter que celle de plusieurs autres appareils de mon invention, d'autant plus qu'il serait prudent d'employer des clapets de retenue, quoique cela ne soit pas indispensable. Il n'est pas d'ailleurs nécessaire d'avoir ainsi deux tubes d'ascension pour qu'il y ait très peu de temps perdu. Si le tuyau d'amont EC (pl. VIII, fig. 17) a une très grande longueur par rapport au tube d'ascension EF et au tuyau de décharge EB, la colonne liquide, après le versement au sommet F, a le temps de faire son oscillation descendante dans le tuyau de décharge, avant qu'il soit revenu une quantité d'eau notable du bief d'amont A.

En 1834, j'ai exécuté un modèle de cette disposition, je l'ai fait fonctionner en présence de plusieurs personnes et notamment de Le Verrier. Ce dernier communiqua mes recherches à M. Liouville et à plusieurs savants.

Il est facile de construire pour les laboratoires, cet appareil tel que je l'ai étudié d'abord. On bouche alternativement l'extrémité B, l'eau après s'être versée en partie au sommet F,

fait une oscillation descendante aussitôt qu'on débouche l'extrémité B. Celle-ci étant, bien entendu, à une certaine hauteur au-dessus du point E, on a même le temps de voir la colonne liquide, si elle n'entre pas dans un réservoir comme cela doit être en général, revenir en arrière, avant qu'il soit arrivé du bief d'amont assez d'eau pour l'en empêcher. En définitive, cette disposition permet de n'avoir à ouvrir et à fermer qu'un seul orifice.

D'après les principes exposés dans la première partie, le tuyau de conduite d'amont ayant une longueur considérable dans les conditions que je viens d'expliquer, la résistance au coude à angle droit brusque en E sera peu de chose par rapport au frottement de ce tuyau. Il est donc convenable que le tube vertical soit perpendiculaire à celui-ci, de manière à laisser toute liberté pour arrondir le coude du tuyau de décharge, puisque c'est dans ce dernier que les vitesses seront les plus grandes. L'oscillation descendante donnera lieu à un travail en résistances passives beaucoup moindre que ne le ferait l'oscillation ascendante, si les tuyaux d'amont et d'aval étaient de longueurs analogues, et d'ailleurs l'extrémité du tuyau de décharge devra toujours être convenablement évasée. Si ces deux tuyaux de conduite ont l'un et l'autre une longueur assez grande relativement au tube d'ascension, quoique le rapport de celui d'aval à celui d'amont soit assez petit, les deux coudes pourront, sans inconvénient sérieux pour les résistances passives, être à angle droit brusque. Dans ce cas, un piston vertical, comme on le voit planche VIII, figure 18, peut mettre alternativement le tuyau d'arrivée en communication avec celui de décharge. La partie inférieure du tube vertical serait alors toujours ouverte et en communication avec le bief d'aval.

Sans attacher beaucoup d'importance à ces dispositions secondaires, il n'est cependant pas sans quelque intérêt d'en conserver la trace. On verra d'ailleurs plus loin comment les

principes exposés dans ce chapitre peuvent être utilisés avec plus de simplicité (1).

Il y a une autre combinaison de colonnes liquides se transportant, sauf les résistances passives, à la hauteur de leur

(1) Quant à l'appareil à soupape, tel qu'il a été exécuté en grand à titre d'essai au Jardin des Plantes en 1839, je dirai seulement quelques mots de son régulateur, du genre de ceux connus sous le nom de *cataracte,* qui est resté au cabinet de l'École polytechnique. On connaît d'ailleurs la *cataracte* employée, même pour une machine à vapeur, aux bains Vigier à Paris.

Deux vases suspendus aux extrémités d'une tige dont l'axe était dans le prolongement de celui de la soupape, étaient alternativement remplis d'eau, un flotteur dans chacun d'eux lâchait en l'élevant en temps utile un déclic qui permettait à celui des deux vases alors rempli d'eau de faire basculer la soupape. Il se vidait ensuite, par les moyens ordinaires, à l'extrémité inférieure de sa course. Il est à remarquer que l'élasticité de cette tige métallique contribue à la faire accrocher plus fortement quand elle passe sur le déclic.

Il y a divers déclics de cette espèce. Celui qui fut employé m'avait été indiqué par M. Barbier. C'était une tige coudée tournant un peu autour de son extrémité inférieure, l'autre venant se poser près du point où devait s'arrêter le vase relevé. Elle finissait par s'appuyer sur une sorte de dent de forme triangulaire, après être passée au-dessus de celle-ci en soulevant une surface courbe. Le flotteur n'avait qu'à relever la partie supérieure coudée pour faire lâcher le déclic, avec peu d'effort, d'autant plus qu'un galet diminuait encore le frottement.

Cette soupape est disposée de manière que, s'il ne pénétrait pas du tout de liquide entre elle et ses sièges, la pression de l'eau tendrait à la tenir fermée. Mais il n'en a pas été ainsi, et il paraît en résulter un fait intéressant pour le mode de transmission des pressions en hydrostatique, c'est que des lames d'eau, trop minces pour couler, transmettent encore les pressions, en tout ou en partie. On a obvié à l'inconvénient qui en résulte, dans cette circonstance, en utilisant, comme je l'ai dit, l'élasticité d'une tige portant les vases de la *cataracte.*

L'eau de chacun des vases dont il s'agit était fournie par un réservoir d'un niveau bien inférieur à celui du bief d'amont. Il n'est pas sans quelque intérêt de conserver la trace du moyen que j'ai employé pour alimenter ce réservoir, parce qu'il peut servir à recevoir avantageusement de l'eau à diverses hauteurs sur un même tuyau d'ascension. Un petit tube latéral, perpendiculaire à celui-ci, était recourbé verticalement, son sommet portant une soupape d'arrêt (pl. VIII, fig. 19). Quand l'eau montait dans le tuyau d'ascension, elle trouvait cette soupape descendue. Elle se versait par cet orifice latéral, et bientôt

centre de gravité pour la vidange du tuyau d'ascension. Si, après le versement au sommet de celui-ci, on ne change pas les communications, la colonne liquide fait une oscillation en retour vers le bief d'amont. Si le sommet du tube d'ascension ne s'élève pas au-dessus du niveau de ce bief à une hauteur aussi grande que celle de la chute motrice, ce tube étant supposé d'égal diamètre partout, il ne se vide pas jusqu'au niveau du bief d'aval. Mais si, quand cette oscillation descen-

elle soulevait cette soupape, de sorte que, pour se rendre au réservoir latéral dont il s'agit, *elle n'avait qu'à descendre d'une petite hauteur.* On conçoit d'ailleurs que la colonne principale, en redescendant, pourrait encore jeter un peu d'eau par ce petit orifice latéral, si la soupape qui le ferme n'était pas très légère.

J'ai cru devoir dire quelques mots de la manière dont ces détails ont été exécutés, le dernier surtout pouvant être utile pour divers appareils, abstraction faite de tout système de régulation. Mais il me paraît plus simple de faire lâcher des déclics par d'autres moyens indiqués ci-dessus.

En 1834, j'avais employé une autre disposition pour ouvrir et fermer alternativement le tuyau d'amont et celui de décharge. C'est un tiroir dessiné, planche I, figure [illegible]. Quand le tuyau d'ascension était plein, il suffisait de lâcher un déclic pour qu'il descendît de lui-même en vertu de la pression de l'eau contenue dans le tube vertical. Lorsque celui-ci était vidé par l'oscillation descendante, un contrepoids faisait remonter ce tiroir quand un déclic était lâché.

J'attache peu d'importance à ces divers détails de construction, ayant depuis cette époque exécuté, comme on le verra plus loin, des appareils de mon invention beaucoup plus simples. Mais je tiens à bien fixer les idées sur le principe même de la combinaison d'oscillations dont il s'agit. Je conserve d'ailleurs la feuille de dessin exprimant cette combinaison avec le tiroir précité, telle qu'elle fut faite sous ma direction à Valognes, en 1834, par M. Locquet, dessinateur, élève du frère Jean-l'Aumônier, aujourd'hui visiteur des Écoles chrétiennes à Paris. Cette feuille porte même encore la date certifiée par la signature de ce dernier.

Cette même année, j'exécutai, comme je l'ai dit, des modèles en petit, fonctionnant d'abord à la main, à Valognes, chez M. de Wéléat, qui voulut bien m'aider dans quelques-unes de mes expériences. Je communiquai, dès lors, mes recherches à diverses personnes, notamment à plusieurs ingénieurs et anciens élèves de l'École polytechnique, ainsi qu'à plusieurs officiers de marine. Personne, d'ailleurs, ne m'en conteste la priorité.

dante est finie, on établit la communication, comme je l'ai indiqué ci-dessus, avec le bief inférieur, il se produit une oscillation de décharge qui vide ce tube au-dessous du niveau de ce bief. De sorte que l'oscillation remontante, quand on rétablira la communication comme elle l'était d'abord, partira d'une profondeur plus grande que celle du niveau du bief inférieur. On conçoit donc que cette disposition peut être utile pour élever de l'eau au-dessus du niveau d'amont à une hauteur moindre que celle de la chute motrice. Il est intéressant de conserver la trace de cette combinaison d'oscillations. Mais, comme on le verra plus loin, j'ai trouvé quelque chose de beaucoup plus simple pour les conditions dont il s'agit (1).

C'est principalement pour les circonstances où l'on a besoin, non seulement d'élever de l'eau, *mais de la conduire à de grandes distances*, que les appareils, objet de ce chapitre,

(1) Un petit balancier à clanche retenait une dent attachée à une poulie fixe qui était attelée d'un côté au tiroir et de l'autre à un contrepoids. Quand l'eau montait dans le tube d'ascension, une capacité latérale était alternativement remplie d'eau, qui soulevait un flotteur. Celui-ci tirait de bas en haut le plus grand bras d'un levier portant un poids et dont l'autre extrémité portait une sorte *d'équerre* mobile autour de son angle, ce qui lui permettait de passer au-dessus de la clanche précitée.

Mais quand la colonne liquide faisait une oscillation en retour à la fin de sa course descendante, la capacité contenant le flotteur se vidait. Celui-ci ne soutenant plus le poids attaché à l'extrémité du bras de levier précité, cela faisait un peu basculer la clanche qui abandonnait la dent; de sorte que le contrepoids précité relevait le tiroir, et ainsi de suite indéfiniment.

L'appareil a fonctionné sous cette forme en 1837, à l'École des mines, en présence d'une commission de l'Institut. Cette forme a été mentionnée dans le rapport de cette commission, comme pouvant, d'ailleurs, servir à la décoration des villes, en produisant un jet d'eau oscillant dans l'air libre. Je ne reproduis pas ici la figure dessinée dans *le Technologiste* en 1850, cette expérience me paraissant aujourd'hui trop secondaire relativement à ce que j'ai fait depuis. Il faudrait d'ailleurs compliquer un peu l'appareil, si l'on voulait profiter en général convenablement de la seconde oscillation descendante vidant le tuyau d'ascension au-dessous du niveau du bief d'aval.

peuvent être recommandés. J'ai déjà dit que l'eau ne s'arrête jamais pendant un temps sensible, quand on ne lui permet pas de retourner en arrière, pour une machine à deux tubes d'ascension. Or, si l'on amenait l'eau par un mouvement permanent dans un tuyau de conduite ordinaire, il en résulterait, pour de grandes distances, une perte de chute qu'on sait calculer approximativement. Si donc on employait une autre machine quelconque à élever de l'eau, la véritable chute motrice serait diminuée de toute la hauteur absorbée par les résistances passives, provenant de l'écoulement de l'eau depuis son point de départ jusqu'à l'endroit où serait cette machine. Ainsi, il ne faut pas mettre sur le compte de l'appareil à double tube d'ascension précité la totalité du travail en résistances passives.

On ne doit pas se dissimuler que, si les coefficients de ces résistances étaient les mêmes pour le mouvement oscillatoire que pour le mouvement permanent, le déchet résultant de ces résistances, toutes choses supposées égales d'ailleurs, serait notablement plus grand dans le mouvement oscillatoire que dans le mouvement permanent, pour amener en général une quantité d'eau donnée. Je suppose que l'appareil n'élevât point d'eau, et fût employé seulement à la conduire à de grandes distances, il résulte de ce que je viens de dire que, même abstraction faite du déchet quelconque provenant de la forme et du jeu de la machine, il y aurait du désavantage à s'en servir au lieu d'amener l'eau par un mouvement permanent dans un tuyau de conduite d'un diamètre et d'une longueur donnés.

Mais, ainsi que je l'ai expliqué dans la première partie de cet ouvrage, les coefficients des frottements, pour certaines limites du rapport des amplitudes des oscillations au diamètre du tuyau de conduite, sont moindres dans le mouvement oscillatoire que dans le mouvement permanent. On ne peut pas encore préciser les différence d'une manière assez rigoureuse. Mais si, comme il y a lieu de le penser d'après des expériences que j'ai faites en 1838 (voir pages 47 à 65), il y a des circons-

tances pour lesquelles la somme de ces coefficients est moitié moindre dans le mouvement oscillatoire que dans le mouvement permanent, on arriverait à une singulière conséquence. Abstraction faite de toute élévation d'eau, l'appareil pourrait être considéré comme un moyen de *dénaturer les frottements*, de manière à amener en définitive plus d'eau que par un mouvement permanent.

Pour s'en rendre compte, il suffit de déterminer, par les moyens indiqués dans la première partie, le travail qui serait nécessaire pour conserver les vitesses de la colonne liquide oscillante comme s'il n'y avait pas de frottement. Connaissant la durée de chaque oscillation et son amplitude, on détermine immédiatement la vitesse moyenne permanente avec laquelle on amènerait une même quantité d'eau. On trouve, en faisant les calculs numériques, que le travail en résistances passives dans le mouvement uniforme, serait, à très peu près, les cinq huitièmes de celui qui aurait été calculé pour le mouvement oscillatoire. Les choses sont modifiées quant à ces calculs à cause de la manière dont les vitesses sont diminuées dans le mouvement oscillatoire par les résistances passives. Mais il est facile de voir que, dans certaines limites, il pourrait y avoir de l'avantage à conduire l'eau, par le mouvement oscillatoire, si l'on admettait l'hypothèse précitée sur la diminution du frottement dans les mouvements de cette espèce.

Je n'attache pas d'importance *pratique* à cette idée. Mais elle est utile du moins pour faire bien sentir le genre tout particulier des effets des résistances passives dans le calcul du rendement de l'appareil à deux tubes d'ascension, quand on est obligé, non seulement d'élever de l'eau, mais de la conduire à de grandes distances, par exemple pour traverser une ville. Ainsi le tuyau de conduite qui amène l'eau aux bassins Racine, après avoir traversé Paris, pourrait servir, s'il était d'un assez grand diamètre, à élever de l'eau à la place de l'Estrapade, tandis que, dans l'état actuel des choses, la chute motrice est entièrement perdue.

J'ai donné dans la première partie les règles au moyen desquelles on peut calculer le déchet, abstraction faite même de la conduite de l'eau en supposant, par excès de prudence, les coefficients des frottements aussi grands dans le mouvement permanent que dans le mouvement oscillatoire (1).

(1) M. Coriolis a publié en 1838 dans le *Journal de mathématiques* de M. Liouville, un mémoire dans lequel il vérifie par l'analyse les résultats précités que j'avais obtenus par la géométrie. On a vu dans la première partie, pages 154 à 157, comment j'ai développé moi-même son analyse dans un travail que j'avais déjà mentionné, dans *le Technologiste* de 1850, page 9 de l'exemplaire d'un travail précité, tiré à part. M. Coriolis a fait dans son mémoire des recherches intéressantes, sur les effets du rétrécissement du tuyau d'ascension, pour l'hypothèse dans laquelle on négligerait les résistances passives, relativement au calcul des effets de cet appareil de mon invention. J'avais présenté quelques considérations sur la manière d'augmenter la hauteur du versement en rétrécissant le tube d'ascension. Je renvoie à son travail pour un développement curieux auquel il parvient au moyen des propriétés de l'hyperbole.

Mais l'étude des résistances passives dans le calcul du rendement est ce qui paraît réellement le plus utile. Je ferai seulement une remarque singulière, que je retrouve dans mes anciennes notes, relativement au cas où l'on négligerait ainsi les résistances passives. J'ai expliqué ci-dessus comment on obtiendrait alors des oscillations d'une amplitude indéfinie. Il en résulte que la moyenne des vitesses pourrait être beaucoup plus grande, pour une chute et une section données, par le mouvement oscillatoire que par le mouvement uniforme. Je n'attache d'ailleurs aucune importance pratique aux considérations de cette espèce, dont il m'a cependant paru intéressant de dire quelques mots.

L'idée d'élever l'eau par oscillation dans un tuyau de conduite recourbé verticalement n'est pas nouvelle. Mais il s'agissait de le faire en épargnant convenablement la force vive. On sait que Manoury d'Ectot a présenté à l'Académie des sciences, vers 1812, un appareil sans pièce mobile qui élevait de l'eau au dessus du niveau du bief d'amont à une hauteur égale à la moitié de celle de la chute. La colonne liquide oscillante *s'écrasait* après son élévation en passant au bief d'aval par un orifice annulaire resté libre entre le tube d'ascension et le tuyau de conduite, à la sortie duquel se trouvait un diaphragme circulaire horizontal. C'était sur cette dernière pièce que la colonne liquide verticale venait *s'écraser*, pour vider le tube d'ascension en perdant une quantité énorme de force vive par son jaillissement latéral. On trouve la description et le dessin de cette machine,

Pour calculer les effets de mes machines à élever de l'eau au moyen des oscillations, il ne suffit pas de connaître le déchet d'une période d'un appareil, dans le cas où il ne sortirait pas d'eau par le sommet du tube d'ascension. Celui-ci ne se prolongeant pas jusqu'à la limite qui pourrait être atteinte, il passe plus d'eau que s'il en était ainsi. Or le chemin

pages 11 et 12 de *l'Essai sur la composition des machines*, par Lantz et Bétancourt. Navier dit qu'il ne paraît pas que cet appareil remarquable puisse être employé avec avantage.

La description précitée est faite, disent ces auteurs, d'après les renseignements donnés par Manoury d'Ectot lui-même. On y déclare que, sans le diaphragme, il n'y aurait pas d'oscillation. Il est bien à remarquer que, si ce système a réellement marché longtemps d'une manière continue, cela ne peut être qu'en vertu des phénomènes de la percussion combinés avec le diaphragme. Or, la percussion est précisément ce que je veux éviter. D'après un catalogue du Conservatoire des arts et métiers, in-18, 1818, l'orifice annulaire d'un des modèles a été engagé dans l'eau du bief inférieur. Mais on ne trouve nulle part aucun résultat d'expériences relatives à cette dernière disposition. La colonne ascendante, en vertu de phénomènes peu connus, devant alors se charger d'une partie de l'eau du bief d'aval, on ne peut prévoir ni le retard qui en résultera, ni l'ensemble des pertes de force vive dans la confusion des mouvements. On ne sait pas si l'on augmentera ou diminuera la hauteur obtenue par la colonne liquide oscillante. On va voir combien ces questions sont délicates.

La difficulté consiste à faire en sorte que le tube vertical se vide assez pour que l'oscillation ascendante recommence. Or, la pression de l'eau du bief supérieur s'opposant à ce que ce tube se vide assez convenablement, je ne peux expliquer cet effet qu'en vertu de la percussion de l'eau qui redescend en rencontrant le diaphragme fixe. La veine liquide, en se détournant pour sortir par l'orifice annulaire, produit cette percussion. Lantz et Bétancourt expliquent l'ascension par la manière dont la veine liquide se contracte avec vitesse en passant de bas en haut autour du diaphragme. Tout cela est déjà difficile à admettre même quand l'orifice annulaire n'est pas engagé dans l'eau du bief inférieur.

Il est à plus forte raison bien plus difficile de prévoir ce qui arrivera si cet orifice annulaire est plongé. On est obligé, en effet, de tenir compte pour ce cas de l'inertie de la colonne liquide engagée au-dessous du niveau du bief inférieur, et il y a certainement, d'après les explications précitées, une limite qui doit être assez restreinte, pour laquelle l'appareil ne fonctionnerait plus. S'il a marché ainsi plongé en partie, rien n'établit que la colonne oscillante ait pu descendre même

des résistances passives étant augmenté par cette raison, le travail de ces résistances est augmenté d'autant plus qu'il faut tenir compte de la vitesse avec laquelle l'eau élevée sort du système, ce qui est une autre cause de perte de force vive. On peut diminuer cette dernière en évasant le sommet du tuyau.

Pour évaluer avec plus de précision le déchet provenant du versement, j'ai fait diverses expériences dont il résulte, dans les circonstances où j'ai opéré, que la quantité d'eau reçue à ce sommet était environ les neuf dixièmes de celle qui aurait été calculée s'il n'y avait pas eu plus de travail en résistances passives, que dans le cas où le tube vertical aurait été indéfiniment prolongé. Pour ces conditions, la hauteur moyenne du jet dans l'air était une fraction sensible de la hauteur du point de versement au-dessus du niveau d'amont. Cette indication provisoire n'a d'ailleurs pour but que de donner une idée des effets dont il s'agit et sur lesquels je reviendrai ultérieurement.

L'appareil de mon invention, objet spécial de ce chapitre, a une propriété qui le distingue de ceux dans lesquels la force

aussi bas que pour les conditions où la veine liquide annulaire sortait au-dessus du niveau de l'eau d'aval. Rien n'indique que Manoury d'Ectot ait eu l'idée de produire une dénivellation au-dessous de ce bief quand même il aurait multiplié les essais sur la possibilité de faire marcher l'appareil plus ou moins engagé dans l'eau du bief inférieur.

Je n'ai rien négligé pour retrouver s'il était possible une trace quelconque des expériences, qui avaient pu être faites sur les modèles déposés par l'auteur au Conservatoire des arts et métiers, et qui malheureusement n'existent plus. Je m'étais d'abord adressé à M. le marquis de Manoury d'Ectot, fils du célèbre inventeur, dont il a publié des travaux inédits. Il a eu l'obligeance de faire des recherches dans ses papiers. Il a retrouvé le Mémoire présenté par son père à l'Institut et qui a été l'objet d'un rapport en 1812, mais les détails que j'aurais voulu connaître n'y étaient pas. Quant au rapport fait à l'Institut sur ce mémoire, relatif d'ailleurs à beaucoup d'autres sujets, et publié dans l'ouvrage de Borgnis, il est tout à fait insuffisant pour l'étude dont il s'agit, il n'a pas même mentionné le diaphragme sans lequel l'auteur déclare que l'appareil ne pourrait pas marcher.

vive s'emmagasine à chaque période, en vertu d'un écoulement *immédiat* au bief d'aval. Ici l'oscillation commençant beaucoup au-dessous du niveau de ce bief, le chemin parcouru par les résistances passives peut être bien moindre pour qu'une quantité donnée de force vive soit produite.

Il y a une autre propriété qui lui est commune avec d'autres appareils à colonne liquide oscillante. Il n'est pas sans intérêt de la signaler, à cause de la manière dont cela peut modifier les distributions d'eau par des branchements. Si les amplitudes des oscillations sont assez considérables dans un tuyau de conduite d'une longueur suffisante, la pression latérale moyenne en un point de ce tuyau, à une certaine hauteur sur le tube vertical, peut être beaucoup plus grande que celle qui aurait lieu au même point dans un état de repos stable. On conçoit, en effet, que si ce point n'est pas trop éloigné de la hauteur du niveau d'amont, la moyenne des pressions résultant d'une ascension assez grande par rapport à la chute motrice peut être considérablement augmentée, de manière à faire bien plus que compenser la suppression de l'action latérale de l'eau pendant l'époque où la colonne liquide est au-dessous du point dont il s'agit.

Si d'ailleurs on amenait l'eau par un mouvement permanent dans un tuyau de conduite, la chute serait entièrement absorbée par les résistances passives. Or, non seulement il y aurait au point où se ferait l'ascension des pressions moyennes qui pourraient être assez fortes, comme je viens de l'expliquer, mais il est bien à remarquer qu'il y en aurait même au-dessus de la hauteur du niveau d'amont. Il est essentiel d'en être averti, parce que cela changerait les conditions des distributions de l'eau par des branchements.

J'ai cru devoir indiquer des propriétés tout à fait spéciales de ce système, bien que ce ne soit pas celui que je recommanderai en général le plus particulièrement pour la pratique. Je dirai encore quelques mots de la forme de son tube d'ascension, d'autant qu'ils seront applicables jusqu'à un cer-

tain point à d'autres appareils à colonne liquide oscillante. Une des formes avantageuses de ce tuyau a de l'analogie avec celle d'une sorte de carafe sans fond, resserrée à une certaine distance en-dessus et en-dessous du niveau du bief d'amont, pour tenir compte de la manière dont le frottement, comme je l'ai dit page 27, agit de telle sorte que ce n'est pas à la hauteur du niveau d'amont qu'il faut commencer à rétrécir le tube d'ascension, pour obtenir en général le plus grand effet possible. Le sommet doit d'ailleurs être évasé, comme je l'ai dit ci-dessus; je reviendrai sur d'autres détails.

La disposition de cet appareil a principalement pour objet d'utiliser les oscillations de l'eau au moyen de principes qui diffèrent essentiellement de ceux du bélier hydraulique. Mais on peut aussi profiter de ses effets au moyen d'un réservoir d'air. Je reviendrai sur les compresseurs.

J'ai lieu de penser que, sauf quelques circonstances exceptionnelles, il sera plus simple d'appliquer mon appareil à tube oscillant, déja mentionné dans la première partie, page 318. Cependant je crois utile de signaler les propriétés les plus essentielles de la machine, objet spécial de ce chapitre, d'autant plus que pour des tuyaux de conduite d'assez grandes longueurs on n'aurait guère à se préoccuper des évasements aux extrémités et de l'emploi des clapets de retenue.

Elle a, surtout à cause de ses principes, été remarquée par l'Académie des sciences.

Voici d'abord un extrait du rapport sur le concours pour le prix de mécanique décerné le 30 décembre 1839 :

«..... Sous le numéro 4 est inscrit un concurrent dont les intéres-
« sants et persévérants travaux sont depuis longtemps connus de
« l'Académie. Le concurrent avait déposé un long mémoire conte-
« nant l'exposé d'un système de machines hydrauliques à colonnes
« oscillantes. Il a répété sous les yeux des membres de la commis-
« sion des expériences variées où ses méthodes sont mises en pra-
« tique. Les commissaires ont particulièrement distingué un appa-

« reil à élever l'eau à colonne oscillante. Cette machine, dont la « théorie avait été soumise à l'examen des commissaires de l'Aca- « démie, a déjà été l'objet d'un rapport de M. Coriolis. La commis- « sion ne saurait mieux justifier la proposition qu'elle fait de dé- « cerner le prix à M. de Caligny qu'en mettant de nouveau sous les « yeux de l'Académie les conclusions très favorables du précédent « Rapport..... »

Voici maintenant un extrait du premier rapport dont il s'agit, lu à l'Académie des sciences, le 20 août 1838, par M. Coriolis, en son nom et en celui de MM. Savart, Poncelet, Séguier et Savary :

«..... Si l'on se trouve dans des circonstances où l'on ait besoin « de conduire l'eau dans des tuyaux d'un bassin supérieur à un « bassin inférieur, comme cela arrive dans les distributions d'eau « des villes, on ne doit réellement compter comme pertes inhérentes « à la machine, que la différence entre les frottements dans des « mouvements périodiques et dans le mouvement uniforme en y « ajoutant les frottements dans le tube vertical et le peu de travail « que demande le jeu du clapet. C'est ainsi qu'on a les véritables « bases du calcul de la machine dans les circonstances où elle paraît « seulement devoir être appliquée. Alors son effet utile devient « assez considérable. Nous avons trouvé, dans ces mêmes exemples, « que le rapport entre le travail utilisé en eau élevée et celui de la « chute, déduction ainsi faite de ce qui est nécessaire au transport « dans les tuyaux était de 0,79 à 0,93. Ces nombres sont peu dif- « férents de ceux qu'a trouvés M. de Caligny au moyen d'ingé- « nieuses considérations géométriques : nous ne les présentons que « comme des aperçus. Il faudra attendre quelques expériences en « grand pour en fixer le chiffre d'une manière plus certaine.

« La machine de M. de Caligny a quelque analogie dans son but « et ses moyens avec le bélier de Montgolfier et avec la colonne oscil- « lante de Manoury d'Ectot. Néanmoins elle diffère assez de ces deux « machines pour qu'on la regarde comme un système à part. Elle « offre, en effet, pour caractère distinctif de ne perdre du travail de « la chute que ce qui est nécessaire pour vaincre les frottements « dans les tuyaux, tandis que, dans les deux machines qu'on vient « de citer, on rejette une certaine quantité de liquide possédant une « force vive qui n'est pas utilisée. Dans le bélier, on produit un

« choc qui, outre la perte de force vive qu'il occasionne a l'incon-
« vénient de fatiguer la machine et de donner lieu à un bruit in-
« commode. Dans la colonne oscillante de Manoury on ne peut élever
« l'eau qu'à une hauteur très bornée, tandis qu'avec la machine
« de M. de Caligny, en faisant descendre le tuyau dans un puits
« construit à cet effet, on peut amener l'eau à une grande hauteur,
« comparativement à la chute disponible.

« L'idée heureuse qui la distingue bien de cette machine à co-
« lonne oscillante et en fait une véritable invention, c'est de vider
« le tube vertical après l'oscillation ascendante, sans perdre d'autre
« force vive que celle qu'exigent les frottements, c'est-à-dire en ne
« faisant descendre que très peu le centre de gravité de la colonne
« fluide qui doit sortir..... Maintenant on se demandera si les cir-
« constances où elle paraît avantageuse se présenteront fréquem-
« ment, nous ne le croyons pas; mais quand même cette machine
« ne devrait pas avoir de très nombreuses applications, cela ne di-
« minue pas son mérite scientifique; elle se classera toujours dans
« les machines bien conçues et qui peuvent être très utiles dans le
« petit nombre de circonstances locales qui en réclameront l'em-
« ploi.

« Bien qu'une partie du mérite de l'invention soit subordonnée à
« une bonne disposition du clapet, dont le jeu a besoin d'être étudié
« par l'expérience, cependant comme ce qui est proposé par l'au-
« teur ne peut manquer de produire l'effet nécessaire avec une
« précision dont le degré seulement ne peut encore être assigné,
« vos commissaires vous proposent de décider que la machine in-
« ventée par M. de Caligny est bien conçue, que par sa simplicite
« elle doit tenir une place marquante parmi celles qui sont destinées
« à élever de l'eau et que sa description doit être insérée dans le
« recueil des *Savants étrangers*.

« Les conclusions de ce rapport sont adoptées. »

A la fin d'un mémoire que j'ai publié sur cette machine dans le *Journal de mathématiques* de M. Liouville, en 1838, j'ai signalé les documents historiques suivants. J'y ajouterai, d'après ce que m'a dit dans le temps M. Mallet, inspecteur général des ponts et chaussées, que Bossut, qui avait cependant indiqué en 1875, le principe sur lequel repose le bélier hydraulique, contesta la possibilité de construire cette machine quand elle fut présentée par Montgolfier.

Héron d'Alexandrie inventa, le premier, une machine à élever l'eau où se présente le principe de l'oscillation des liquides.

« En 1726, Dénisard et de La Deuille ont inventé la machine à colonne d'eau où ce principe se ıetrouve.

« En 1775, Witehurst a inventé un bélier hydraulique.

« En 1797, Montgolfier en a présenté un tout différent.

« En 1812, Manoury d'Ectot a inventé une machine à colonne oscillante.

« On a toujours bien su qu'on pouvait élever de l'eau par une première oscillation dans un tuyau de conduite, cette idée ne mérite pas d'être réclamée; mais le problème consistait à recommencer en vidant le tuyau d'ascension d'une manière convenable.

« Ces diverses solutions, la machine à colonne d'eau, le bélier et la colonne oscillante, n'ont au fond d'autre rapport entre elles et avec ma propre solution, que le principe de l'oscillation de l'eau, principe connu de toute antiquité. Personne ne peut s'en attribuer l'invention, car il nous est révélé par le jeu des vagues dans le creux des rochers et l'on trouve même sur plusieurs côtes des corps de bélier naturels.

« Dès l'année 1766, Borda avait publié dans les *Mémoires de l'Académie des sciences*, sur les oscillations de l'eau dans un tube vertical, une expérience d'un genre indiqué trente ans auparavant par Daniel Bernoulli (*Voyez* les expériences de ce dernier, *Hydrodynamicæ*, 1738, pages 141-143); il avait même employé des tubes *coniques*. Le fait suivant suffira d'ailleurs pour prouver que la difficulté des problèmes dont il s'agit consistait uniquement à reproduire indéfiniment, d'une manière convenable, des effets connus et expliqués depuis longtemps. Bossut, qui a varié l'expérience de Borda plus de vingt ans avant Montgolfier, avait lui-même expliqué pourquoi *quelque fois l'eau qui sort par un ajutage saillit plus haut que ne le demande la hauteur du réservoir*. On peut voir avec détail son explication (*Hydrodynamique*, tome II, p. 101, 1775). »

Il faut lire figure 3 au lieu de figure 15, à la page 709. J'ai oublié, relativement à divers régulateurs proposés pour ce système, de rappeler que, dans ceux où la fermeture alternative est indiquée comme se faisant au moyen de surfaces frottantes, on peut l'obtenir sans leur frottement, en construisant des sièges fixes contre lesquels viennent s'appuyer des rebords laissant d'ailleurs très peu de jeu entre eux et les enveloppes métalliques.

Bélier univalve.

J'ai pensé que la manière de montrer à quel point l'appareil, objet spécial de ce chapitre, a des propriétés essentiellement différentes de celles du bélier hydraulique, était de transformer ce dernier en machine à colonne liquide oscillante. L'eau d'un réservoir en A, figure 20, planche VIII, est en communication avec le tuyau horizontal CEF dont l'autre extrémité, recourbée verticalement, a un diamètre un peu moindre : le coude qui réunit la partie horizontale à la partie verticale se rétrécit graduellement pour éviter les changements brusques de vitesses. Une soupape D disposée près du tuyau vertical empêche l'eau de sortir quand l'appareil n'est pas en train.

Pour le faire marcher il suffit de baisser cette soupape une première fois. La partie horizontale du tuyau de conduite étant notablement plus longue que la partie verticale, l'eau contenue dans la première résiste assez par son inertie pour que le tuyau vertical ait le temps de se vider par la soupape. L'eau sort comme dans le bélier élévatoire de Montgolfier, jusqu'à ce que la soupape soit soulevée précisément comme sa soupape d'arrêt. Pendant cet écoulement, une colonne d'eau d'une petite hauteur se tient dans le coude en vertu de la percussion du liquide se versant au bief d'aval. Lorsque la soupape se ferme, l'eau monte, à cause de la vitesse acquise dans tout le système liquide en amont, au-dessus du double de la hauteur de la chute motrice, même quand le tube vertical est d'égal diamètre partout. Il s'en verse au sommet F. La colonne liquide fait ensuite une oscillation en retour assez bas pour que la soupape D soit abandonnée à son propre poids, de manière à s'ouvrir d'elle-même, et le jeu continue indéfiniment.

Il est essentiel de remarquer que le bas du tuyau d'ascension contient très peu d'eau à l'époque où la soupape se ferme. Cela empêche qu'il y ait un coup de bélier trop sensible. Cet appareil met en jeu une nouvelle espèce de *pression hydraulique.* Quand la soupape se ferme, la colonne liquide *passe à la filière* en vertu du mouvement acquis dans le coude graduellement rétréci. La fermeture de la soupape est assurée au besoin par la réaction provenant de cette cause. Ce rétrécissement ne paraît pas d'ailleurs indispensable pour assurer cette fermeture (1).

Il résulte des principes exposés par M. le général Poncelet que l'on peut se former une idée des pressions qui engendrent de la vitesse dans la petite colonne liquide en aval de la soupape d'arrêt d'un bélier hydraulique, puisque celle-ci se ferme dans un temps appréciable (*Introduction à la mécanique industrielle 2e édition, n° 168*). Pour étudier cette question j'ai disposé sur la paroi supérieure du tuyau de conduite, un peu en amont de la soupape, un orifice toujours ouvert, d'un diamètre petit mais suffisant pour qu'au moment de la levée de la soupape il puisse en sortir une espèce de *bombe liquide*, qui ne soit pas seulement formée de très petites gouttes. Or, à l'instant où la soupape se fermait, la *bombe liquide* s'élevait seulement au double environ de la hauteur de la chute motrice.

(1) J'ai déjà mentionné p. 708 une soupape d'*arrêt*, qui reste alternativement fermée, sans qu'on soit obligé d'employer un rétrécissement de ce genre. Il suffit que son poids soit réglé de manière à être moindre que la pression tendant à la tenir fermée en appuyant contre sa surface inférieure. Or, ici la colonne liquide est maintenue dans le tuyau d'ascension à une hauteur, petite relativement à la chute motrice, mais résultant du choc direct de l'eau qui se détourne pour passer par la soupape. C'était même sans le rétrécissement dont il s'agit que j'avais d'abord présenté le principe de ce *bélier univalve* à l'Académie des sciences en 1837. Je reviendrai sur ce sujet, mais j'ai cru devoir décrire le modèle sous la forme qui a été exécutée. J'ajouterai qu'il a fallu pour que la soupape retombât régulièrement d'elle-même, que les bords de la partie supérieure fussent bien plans. Dans ces petits modèles les *joints coniques* au pourtour donnaient lieu à trop d'adhérence.

Après ce premier moment, le jet suivait graduellement dans l'air libre au-dessus et au-dessous du niveau d'amont les mouvements de la colonne liquide du tuyau vertical. J'ai déjà parlé, dans la première partie, de ce dernier phénomène qui, pour le cas où le jet serait convenablement incliné, servirait au besoin à élever de l'eau dans des réservoirs superposés d'une manière analogue à celle des marches d'un escalier.

Si cette machine peut avoir quelques avantages à cause de son extrême simplicité, je la signale seulement aujourd'hui, ainsi que je l'ai dit ci-dessus, comme un *appareil de laboratoire*. Le modèle qui a fonctionné en 1839 devant une commission de l'Institut a été mis par M. Savary au cabinet de l'Ecole polytechnique. Je reviendrai ultérieurement sur une application plus intéressante et plus pratique des principes sur lesquels il repose, sa soupape n'étant pas disposée de manière à débiter beaucoup d'eau sans une grande perte de force vive.

J'ai déjà mentionné, pages 445 et 644, un mémoire publié dans les Annales des mines en 1838 sur cet appareil de mon invention. A cette époque, il n'avait pas encore été exécuté.

Influence des hauteurs de versement au-dessus du niveau du bief d'amont.

Il résulte des formules et des expériences décrites dans la première partie que, toutes choses égales d'ailleurs, si l'on ne se sert pas d'un réservoir d'air pour augmenter la hauteur à laquelle l'eau est élevée, plus le rapport de l'amplitude au diamètre du tuyau est considérable, plus le déchet est grand relativement au travail de la pesanteur. Si donc on n'avait pas à tenir compte de ce que le chemin des résistances passives et leur travail total sont augmentés, quand le tube vertical ne se prolonge pas jusqu'à la limite de hauteur que l'oscillation pouvait atteindre, et de ce que la vitesse de sortie au

Il est essentiel de remarquer que le bas du tuyau d'ascension contient très peu d'eau à l'époque où la soupape se ferme. Cela empêche qu'il y ait un coup de bélier trop sensible. Cet appareil met en jeu une nouvelle espèce de *pression hydraulique*. Quand la soupape se ferme, la colonne liquide *passe à la filière* en vertu du mouvement acquis dans le coude graduellement rétréci. La fermeture de la soupape est assurée au besoin par la réaction provenant de cette cause. Ce rétrécissement ne paraît pas d'ailleurs indispensable pour assurer cette fermeture (1).

Il résulte des principes exposés par M. le général Poncelet que l'on peut se former une idée des pressions qui engendrent de la vitesse dans la petite colonne liquide en aval de la soupape d'arrêt d'un bélier hydraulique, puisque celle-ci se ferme dans un temps appréciable (*Introduction à la mécanique industrielle 2e édition, n° 168*). Pour étudier cette question j'ai disposé sur la paroi supérieure du tuyau de conduite, un peu en amont de la soupape, un orifice toujours ouvert, d'un diamètre petit mais suffisant pour qu'au moment de la levée de la soupape il puisse en sortir une espèce de *bombe liquide*, qui ne soit pas seulement formée de très petites gouttes. Or, à l'instant où la soupape se fermait, la *bombe liquide* s'élevait seulement au double environ de la hauteur de la chute motrice.

(1) J'ai déjà mentionné p. 708 une soupape d'*arrêt*, qui reste alternativement fermée, sans qu'on soit obligé d'employer un rétrécissement de ce genre. Il suffit que son poids soit réglé de manière à être moindre que la pression tendant à la tenir fermée en appuyant contre sa surface inférieure. Or, ici la colonne liquide est maintenue dans le tuyau d'ascension à une hauteur, petite relativement à la chute motrice, mais résultant du choc direct de l'eau qui se détourne pour passer par la soupape. C'était même sans le rétrécissement dont il s'agit que j'avais d'abord présenté le principe de ce *bélier univalve* à l'Académie des sciences en 1837. Je reviendrai sur ce sujet, mais j'ai cru devoir décrire le modèle sous la forme qui a été exécutée. J'ajouterai qu'il a fallu pour que la soupape retombât régulièrement d'elle-même, que les bords de la partie supérieure fussent bien plans. Dans ces petits modèles les *joints coniques* au pourtour donnaient lieu à trop d'adhérence.

Après ce premier moment, le jet suivait graduellement dans l'air libre au-dessus et au-dessous du niveau d'amont les mouvements de la colonne liquide du tuyau vertical. J'ai déjà parlé, dans la première partie, de ce dernier phénomène qui, pour le cas où le jet serait convenablement incliné, servirait au besoin à élever de l'eau dans des réservoirs superposés d'une manière analogue à celle des marches d'un escalier.

Si cette machine peut avoir quelques avantages à cause de son extrême simplicité, je la signale seulement aujourd'hui, ainsi que je l'ai dit ci-dessus, comme un *appareil de laboratoire*. Le modèle qui a fonctionné en 1839 devant une commission de l'Institut a été mis par M. Savary au cabinet de l'Ecole polytechnique. Je reviendrai ultérieurement sur une application plus intéressante et plus pratique des principes sur lesquels il repose, sa soupape n'étant pas disposée de manière à débiter beaucoup d'eau sans une grande perte de force vive.

J'ai déjà mentionné, pages 445 et 644, un mémoire publié dans les Annales des mines en 1838 sur cet appareil de mon invention. A cette époque, il n'avait pas encore été exécuté.

Influence des hauteurs de versement au-dessus du niveau du bief d'amont.

Il résulte des formules et des expériences décrites dans la première partie que, toutes choses égales d'ailleurs, si l'on ne se sert pas d'un réservoir d'air pour augmenter la hauteur à laquelle l'eau est élevée, plus le rapport de l'amplitude au diamètre du tuyau est considérable, plus le déchet est grand relativement au travail de la pesanteur. Si donc on n'avait pas à tenir compte de ce que le chemin des résistances passives et leur travail total sont augmentés, quand le tube vertical ne se prolonge pas jusqu'à la limite de hauteur que l'oscillation pouvait atteindre, et de ce que la vitesse de sortie au

Il est essentiel de remarquer que le bas du tuyau d'ascension contient très peu d'eau à l'époque où la soupape se ferme. Cela empêche qu'il y ait un coup de bélier trop sensible. Cet appareil met en jeu une nouvelle espèce de *pression hydraulique*. Quand la soupape se ferme, la colonne liquide *passe à la filière* en vertu du mouvement acquis dans le coude graduellement rétréci. La fermeture de la soupape est assurée au besoin par la réaction provenant de cette cause. Ce rétrécissement ne paraît pas d'ailleurs indispensable pour assurer cette fermeture (1).

Il résulte des principes exposés par M. le général Poncelet que l'on peut se former une idée des pressions qui engendrent de la vitesse dans la petite colonne liquide en aval de la soupape d'arrêt d'un bélier hydraulique, puisque celle-ci se ferme dans un temps appréciable (*Introduction à la mécanique industrielle 2e édition, n° 168*). Pour étudier cette question j'ai disposé sur la paroi supérieure du tuyau de conduite, un peu en amont de la soupape, un orifice toujours ouvert, d'un diamètre petit mais suffisant pour qu'au moment de la levée de la soupape il puisse en sortir une espèce de *bombe liquide*, qui ne soit pas seulement formée de très petites gouttes. Or, à l'instant où la soupape se fermait, la *bombe liquide* s'élevait seulement au double environ de la hauteur de la chute motrice.

(1) J'ai déjà mentionné p. 708 une soupape d'*arrêt*, qui reste alternativement fermée, sans qu'on soit obligé d'employer un rétrécissement de ce genre. Il suffit que son poids soit réglé de manière à être moindre que la pression tendant à la tenir fermée en appuyant contre sa surface inférieure. Or, ici la colonne liquide est maintenue dans le tuyau d'ascension à une hauteur, petite relativement à la chute motrice, mais résultant du choc direct de l'eau qui se détourne pour passer par la soupape. C'était même sans le rétrécissement dont il s'agit que j'avais d'abord présenté le principe de ce *bélier univalve* à l'Académie des sciences en 1837. Je reviendrai sur ce sujet, mais j'ai cru devoir décrire le modèle sous la forme qui a été exécutée. J'ajouterai qu'il a fallu pour que la soupape retombât régulièrement d'elle-même, que les bords de la partie supérieure fussent bien plans. Dans ces petits modèles les *joints coniques* au pourtour donnaient lieu à trop d'adhérence.

Après ce premier moment, le jet suivait graduellement dans l'air libre au-dessus et au-dessous du niveau d'amont les mouvements de la colonne liquide du tuyau vertical. J'ai déjà parlé, dans la première partie, de ce dernier phénomène qui, pour le cas où le jet serait convenablement incliné, servirait au besoin à élever de l'eau dans des réservoirs superposés d'une manière analogue à celle des marches d'un escalier.

Si cette machine peut avoir quelques avantages à cause de son extrême simplicité, je la signale seulement aujourd'hui, ainsi que je l'ai dit ci-dessus, comme un *appareil de laboratoire*. Le modèle qui a fonctionné en 1839 devant une commission de l'Institut a été mis par M. Savary au cabinet de l'Ecole polytechnique. Je reviendrai ultérieurement sur une application plus intéressante et plus pratique des principes sur lesquels il repose, sa soupape n'étant pas disposée de manière à débiter beaucoup d'eau sans une grande perte de force vive.

J'ai déjà mentionné, pages 445 et 644, un mémoire publié dans les Annales des mines en 1838 sur cet appareil de mon invention. A cette époque, il n'avait pas encore été exécuté.

Influence des hauteurs de versement au-dessus du niveau du bief d'amont.

Il résulte des formules et des expériences décrites dans la première partie que, toutes choses égales d'ailleurs, si l'on ne se sert pas d'un réservoir d'air pour augmenter la hauteur à laquelle l'eau est élevée, plus le rapport de l'amplitude au diamètre du tuyau est considérable, plus le déchet est grand relativement au travail de la pesanteur. Si donc on n'avait pas à tenir compte de ce que le chemin des résistances passives et leur travail total sont augmentés, quand le tube vertical ne se prolonge pas jusqu'à la limite de hauteur que l'oscillation pouvait atteindre, et de ce que la vitesse de sortie au

sommet est une cause de perte de force vive, le rendement serait d'autant plus grand que la hauteur du versement au-dessus du niveau d'amont serait moindre pour les fig. 15 et 17.

On peut en rétrécissant graduellement la partie supérieure du tuyau vertical, selon les règles indiquées dans cet ouvrage, ramener jusqu'à un certain point les conditions de l'élévation de l'eau à des hauteurs assez grandes à celles du versement de l'eau à des petites hauteurs. Mais il faut tenir compte de la manière dont le frottement est alors modifié, par la diminution des diamètres, et de celle dont sont augmentées les vitesses de sortie, par les sections du sommet.

Dans plusieurs de mes appareils, je diminue les sections du tuyau d'ascension d'une autre manière avec une *pièce intérieure fixe*, qui permet de faire verser l'eau par une circonférence extérieure plus grande que si ce tuyau était rétréci. Mais cela augmente la somme des surfaces frottantes, le choix de ces deux dispositions dépend de circonstances sur lesquelles je reviendrai.

Quand on élève de l'eau à de très petites hauteurs au-dessus du niveau du bief d'amont, le chemin parcouru par les résistances passives pouvant être très grand, il est intéressant d'examiner un autre mode de versement. Je suppose que le tube vertical soit indéfiniment prolongé, et qu'au lieu de recevoir l'eau élevée par son sommet, on la fasse entrer par une oscillation latérale dans un réservoir, dont le niveau est à la hauteur où l'on a besoin de l'élever. On conçoit que s'il n'y avait pas de cause de déchet, la colonne liquide dont il s'agit passerait tout entière à la hauteur de son centre de gravité.

On n'aurait plus à vider, pour pouvoir recommencer, que la quantité d'eau restée au-dessous de la limite inférieure de l'oscillation. Si la hauteur de versement au-dessus du niveau d'amont était très petite, par rapport à celle de la chute motrice, il n'y aurait pas même à se préoccuper sérieusement de faire passer cette eau au bief d'aval par une oscillation

descendante; en effet, la hauteur de son centre de gravité au-dessus du niveau de ce bief ne serait qu'une fraction peu importante de la chute motrice. Cette manière de recevoir l'eau élevée est intéressante au point de vue de la théorie, mais elle compliquerait un peu l'appareil. On verra plus loin comment, pour ce cas particulier, les choses peuvent être disposées d'une manière plus intéressante. Il s'agit surtout dans ce chapitre de fixer les idées sur des principes nouveaux.

CONCLUSIONS.

J'ai décrit dans ce chapitre plusieurs régulateurs de l'appareil dont le tube vertical s'enfonce dans un puits assez profond au-dessous du niveau du bief inférieur. L'un d'eux est celui qui a fonctionné au Jardin des Plantes, en présence de la commission du prix de mécanique, en 1839, depuis la publication du premier rapport fait à l'Institut sur ce système. Il est moins simple que celui de la figure 16, planche VIII, que j'ai présenté à l'Institut en 1855.

Mais tout en conservant la trace de ces divers régulateurs, je préfère en général la forme de l'appareil de la figure 17 que j'ai présentée à l'Institut le 10 juillet 1837. Il est bien à remarquer que dans ce système on n'a plus besoin d'employer une soupape gardant l'eau dans les deux sens, parce que le retour de l'eau d'aval après l'oscillation descendante peut être empêché au besoin par un clapet ordinaire de retenue.

La longue colonne liquide d'amont faisant fonction de soupape pendant l'oscillation de décharge, la profondeur à laquelle l'eau peut descendre n'est limitée, sauf les résistances passives, que par celle du puits. Pour fermer la soupape, qui doit garder l'eau pendant l'ascension de la colonne liquide, et peut être disposée au sommet d'un tuyau de décharge, on a tout le temps qui s'écoule entre l'instant où l'ascension

commence jusqu'à ce que cette colonne arrive au niveau du bief d'aval si l'on emploie un clapet de retenue. Parmi les moyens qui peuvent être indiqués pour une manœuvre exigeant aussi peu de précision, il suffit de signaler un vase alternativement rempli d'eau.

Quant à la manière de faire ouvrir cette soupape, après le versement au sommet du tube d'ascension, la longue colonne liquide d'amont, résistant par son inertie, donne le temps de lâcher un déclic à un instant convenable pour qu'un contrepoids relève la soupape qui retient l'eau de dedans en dehors. Ce déclic peut être lâché, soit au moyen d'un petit vase alternativement rempli d'eau, soit au moyen d'un flotteur, qui, par exemple, serait abandonné au sommet du tube d'ascension par un commencement de retour vers le bief d'amont, ce qui occasionnerait pour ainsi dire aussi peu de perte de travail qu'on le voudrait, puisqu'il aurait assez de lenteur pour permettre à l'oscillation de décharge de se faire vers le bief d'aval, à peu près comme dans l'expérience précitée, présentée à l'Institut le 10 juillet 1837. Cet appareil a d'ailleurs principalement pour objet, comme le remarque le rapport à l'Institut du 20 août 1838, le cas où l'eau doit non seulement être élevée, mais conduite à de grandes distances (1).

Dans les circonstances où il ne sera pas nécessaire de donner à la partie inférieure du tube vertical une section plus grande qu'à sa partie supérieure, il pourra être convenable que ce tube ait sur toute sa hauteur des sections moindres que le reste des tuyaux. Dans certaines limites, il en résultera une augmentation de *rendement*, mais l'appareil débitera moins d'eau. Le sommet pourra être évasé. (V. la 1re partie, p. 28.)

(1) J'ai montré comment on pouvait transformer le bélier hydraulique en machine à colonne liquide oscillante. Je voulais par cette transformation mieux faire voir à quel point le système précédent diffère du bélier. Je reviendrai d'ailleurs sur les considérations résultant de combinaisons analogues.

EXPÉRIENCES

SUR UN

NOUVEAU MOTEUR HYDRAULIQUE

A FLOTTEUR OSCILLANT

Principes de quelques modifications.

Description de l'appareil et objet de ces expériences.

Le moteur hydraulique de mon invention, objet de ces expériences, a été décrit dans un rapport de MM. Combes et Cagniard de Latour à la Société philomathique, le 30 mars 1839, publié dans le journal l'*Institut* et dans le *Journal de mathématiques* de M. Liouville; ainsi que dans deux rapports favorables faits à l'Académie des sciences, le premier rédigé par M. Coriolis, le 13 janvier 1840, le second, par M. Lamé, le 7 octobre 1844. La description suivante de l'appareil d'essai que j'ai exécuté aux bassins de Chaillot, sous les auspices de M. Mary, inspecteur général des ponts et chaussées, suffira pour rappeler en quoi consiste ce système (Voir pl. VIII, fig. 21 et 22). M. Corot, ingénieur civil, ancien élève de l'École centrale des arts et manufactures, attaché à la direction des eaux de Paris, a bien voulu m'aider dans la plupart des expériences suivantes. J'ai répété les principales devant une commission de l'Institut et deux réunions de savants, dont faisaient partie plusieurs inspecteurs généraux et plusieurs ingénieurs en chef des ponts et chaussées,

ainsi que divers membres du conseil de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale.

Un tuyau CD de $0^m,4$ de diamètre intérieur et de 20 mètres de long, formé de la réunion de plusieurs tuyaux de fonte à emboîtement, de $2^m,5$ de long chacun, était couché horizontalement sur le fond d'un des bassins de Chaillot. Un tuyau vertical en zinc, de $1^m,75$ de long et de même diamètre intérieur, était raccordé avec ce tuyau horizontal au moyen d'un coude en fonte, aussi de même diamètre et de 1 mètre environ de rayon intérieur, formé de deux tuyaux à bride. Cet ensemble composait ainsi un large tuyau d'une forme analogue à un L.

Sur le sommet de la partie verticale était disposé un réservoir N en zinc de $1^m,50$ de diamètre et de $0^m,50$ de haut. Mais, comme on l'avait fait carré pour le fixer dans l'angle du réservoir, il s'était voilé, et ne gardait plus l'eau qu'à $0^m,34$ au-dessus du sommet du tuyau vertical terminé par un anneau en cuivre de $0^m,02$ de large, mais de même diamètre intérieur que le tuyau.

L'eau était versée dans ce réservoir par une grande cuve de jauge, contenant environ 10 mètres cubes et auquel était adapté un gros robinet vanne que l'on ouvrait quand on voulait faire fonctionner l'appareil. Ce robinet était disposé de manière que le mouvement de l'eau affluente ne pouvait que nuire à son introduction dans le tuyau vertical, à cause de la force centrifuge qui en résultait autour de l'orifice de ce tuyau, afin de ne pas faire estimer trop haut l'effet utile.

L'entrée de l'eau du bassin quadrangulaire dans le tuyau vertical était alternativement interrompue et rétablie au moyen d'une sorte de vanne cylindrique ou soupape annulaire FGH ouverte à ses deux extrémités, de $0^m,50$ de haut, formée de deux tuyaux en zinc concentriques, réunis par le bas et par le haut au moyen de deux couronnes annulaires, de façon à ne contenir que de l'air dans leur intervalle. Le diamètre du plus large de ces deux tuyaux était de $0^m,44$,

celui du tuyau intérieur était de $0^m,36$. Ce dernier tuyau était entièrement et invariablement ouvert à ses deux extrémités. Cette soupape annulaire était soudée sur un anneau plat en cuivre de $0^m,02$ de large, semblable au siège fixe dont nous avons déjà parlé. Elle était tout simplement guidée, dans cet *appareil provisoire*, au moyen de trois tringles en fer de $0^m,32$ de saillie, réunies inférieurement, pour la solidité, par un petit cercle en zinc. La soupape et ces tringles qui lui étaient soudées pesaient en tout 17 kil., 5 environ. Sa percussion sur son siège était insignifiante, et il eût été facile d'ailleurs de l'amortir par des procédés connus.

Cette soupape était en partie équilibrée au moyen d'un balancier en fer IKG dont chaque bras avait environ 1 mètre de long, et qui était mobile autour d'un tourillon de $0^m,02$ de diamètre. Une de ses extrémités embrassait la soupape annulaire au moyen d'une fourche qui y était adaptée de chaque côté par des tourillons de $0^m,009$ de diamètre. Le poids du balancier était de 9 kil., 50. Le contrepoids était suspendu à l'autre bras du balancier au moyen d'une queue en fer mobile à cette extrémité, à laquelle elle tenait par un anneau. On le réglait de manière que la soupape conservât assez de poids pour bien fermer. On l'a fait varier sans que cela eût bien de l'importance. Quant à l'effet utile définitif, un excès de 5 ou 6 kilogrammes sur le contrepoids suffisait pour tenir la soupape fermée. Cette queue portait inférieurement une rondelle en zinc de $0^m,23$ de diamètre, qui venait périodiquement s'enfoncer dans un seau ordinaire M contenant de l'eau jusqu'à une certaine hauteur. Il résultait de cette disposition tenant lieu d'un corps mou, que la soupape, lorsqu'elle était levée à la hauteur voulue, s'arrêtait sans ballotter d'une manière gênante pour l'écoulement de l'eau dans le système.

Le flotteur en zinc P qui utilisait le travail de l'eau motrice, était formé d'un cylindre d'à peu près $0^m,28$ de diamètre, de $0^m,98$ environ de long, mais les extrémités étaient arrondies.

Il portait un cône à chacune de ces extrémités. Le cône inférieur avait un côté à peu prés égal à ce diamètre. Le cône supérieur avait $0^m,50$ de côté, et portait à son sommet une tubulure pour y introduire de l'eau, et une armature de $0^m,13$ de long, destinée à l'attacher à une corde de $0^m,02$ de diamètre, qui, passant sur deux poulies de renvoi, tenait à son autre extrémité un déclic ordinaire, qui accrochait périodiquement un mouton du poids de 53 kilogrammes, soulevé à chaque période à une hauteur de $1^m,62$.

Le flotteur cylindrique dont je viens de parler passait librement au milieu de la soupape annulaire, ouverte, comme je l'ai dit, à ses deux extrémités, et à laquelle cette forme donnait aussi l'avantage de laisser la colonne liquide dans le tuyau de conduite abandonnée librement à elle-même quand l'écoulement du bief supérieur était interrompu, sans que la colonne oscillante subît aucune interruption; en un mot, sans qu'il fût possible de produire un *coup de bélier*, quand même on l'aurait voulu.

Voici maintenant comment la machine fonctionne. Le tuyau vertical étant une première fois rempli d'eau, comme je l'expliquerai plus loin, quoiqu'il soit toujours ouvert à ses deux extrémités, la soupape annulaire *flotte*, et permet à l'eau du bief supérieur de s'introduire dans le tuyau vertical. La vitesse s'engendre alors graduellement dans le tuyau de conduite, en vertu de la hauteur du niveau du bief supérieur au-dessus de celui du bief inférieur. Au premier instant, la pression motrice se compose de deux parties, de celle de l'eau dans le réservoir ou bief supérieur, sur le siège de la soupape annulaire, et de la pression de l'eau contenue dans le tuyau vertical au-dessus du niveau du bief inférieur jusqu'à ce siège fixe. En vertu de cette dernière pression, même abstraction faite des phénomènes de diminutions de pression étudiés par D. Bernoulli et par d'autres auteurs, il y aurait une époque à laquelle le tuyau tendrait à débiter plus d'eau que ne peut en fournir le réservoir supérieur par l'orifice

resté libre à cause de la levée de la soupape. Alors il se produirait une diminution de pression à l'intérieur, et la soupape retomberait sur son siège de la manière suivante; mais, à cause des phénomènes précités, il n'est pas nécessaire que les vitesses soient aussi grandes dans les conditions dont il s'agit.

Il se présente, à l'époque dont je viens de parler, un effet assez intéressant. Pendant que la soupape est ouverte, de manière à conserver dans son tuyau central une colonne liquide annulaire comprise entre les parois de ce tuyau et le flotteur cylindrique remonté, ce flotteur et cette colonne liquide annulaire semblent rester en repos. Mais à l'instant où la vitesse voulue est acquise dans le tuyau de conduite, cette colonne, soutenue ainsi pendant un certain temps, comme le serait une sorte de colonne manométrique, à un niveau un peu moins élevé que celui du réservoir supérieur, mais sensiblement constant, descend tout à coup, et cesse de soutenir latéralement la soupape, qui tombe brusquement sur son siège. On avait tout le temps nécessaire pour s'assurer de la stabilité dont il s'agit, car la durée totale du temps pendant lequel la soupape ne reposait pas sur son siège était d'un peu plus de 4 secondes.

Cette opération étant finie, la colonne liquide, abandonnée à son libre mouvement dans le tuyau de conduite toujours ouvert à ses deux extrémités, puisque la soupape est annulaire, descendait autour du flotteur cylindrique, et lui permettait d'agir par son propre poids sur la résistance à vaincre. On le voyait bientôt entièrement découvert. La colonne liquide, en vertu de son mouvement acquis, descendait à une certaine profondeur au-dessous du niveau du bief inférieur. Elle remontait ensuite et rencontrait le flotteur. A la fin de sa descente, celui-ci venait y éteindre sa vitesse et décrochait le mouton parvenu au haut de sa course. Alors cette colonne enveloppait graduellement le flotteur ; au premier instant de sa rencontre, elle bouillonnait un peu autour

de son cône inférieur, puis elle lui donnait bientôt, en vertu de sa pression latérale graduellement croissante, une vitesse de bas en haut à peu près égale, en général, à la sienne propre. Enfin la colonne, arrivée au haut de sa course, entr'ouvrait la soupape, qui, permettant à l'eau du bief supérieur de se poser sur l'eau remontante, contribuait avec elle à remettre les choses dans l'état où elles étaient avant la descente du flotteur, c'est-à-dire à rétablir la colonne à peu près de niveau avec le bief supérieur, et ainsi de suite indéfiniment.

On voit que, dans cette expérience, ce n'est pas l'eau qui *travaille* immédiatement ; elle ne travaille qu'à relever le flotteur, dont le poids, abandonné ensuite à lui-même, agit directement sur la résistance à vaincre. La descente du flotteur durait environ 3 secondes, et son ascension 2 secondes. La durée totale de chaque période était d'à peu près 9 1/2 secondes ; il y en avait cinquante-sept en 9 minutes environ (1).

On fera, en général, débiter à la machine un peu plus d'eau que cela n'est nécessaire, afin de pouvoir tenir compte des irrégularités accidentelles. Ainsi que je le remarquerai plus

(1) Pour transformer le mouvement alternatif du flotteur en mouvement circulaire, on aurait pu, si ce flotteur avait été guidé, le faire travailler en partie de bas en haut, en réglant sa densité d'une manière convenable. Il est évident qu'on aurait pu le faire monter beaucoup moins vite, puisqu'il se repose un certain temps au haut de sa course. On conçoit donc que si un volant l'avait fait convenablement émerger au haut de cette course, cela aurait suffi pour que l'on eût pu sans beaucoup de difficulté rendre la durée de la course ascendante égale à celle de la course descendante, d'autant plus qu'à la fin de la période, la vitesse dans le sens vertical est nécessairement très affaiblie quand on emploie un volant. Mais on peut diminuer cette élévation au-dessus de l'eau en faisant plonger un peu plus profondément, au moyen du même volant, le flotteur dans la colonne remontante. Il suffit de remarquer, relativement à cette expérience, que la colonne liquide descend au-dessous du flotteur et le rencontre dans son oscillation en retour. Or, pour augmenter la durée de cette époque du mouvement, il aurait suffi d'élargir convenablement le bas du tuyau vertical, puisqu'il faut d'autant plus de temps pour éteindre ou pour engendrer

loin, quand elle débite un peu trop d'eau, il en remonte au bief supérieur à chaque période, de sorte que cela n'a pas beaucoup d'inconvénients.

Dans cet appareil d'essai, le flotteur cylindrique n'était pas guidé ; il ballottait, abandonné à lui-même dans la colonne liquide, et rencontrait même quelquefois la paroi du tuyau ou les guides de la soupape. C'est par cette raison que j'avais plus allongé le cône supérieur que le cône inférieur. Quant à ce dernier, je pense que, pour ces conditions de l'appareil, sa forme doit être dans une bonne exécution, considérée plutôt comme celle d'une poupe que comme celle d'une proue ; car il resterait principalement à considérer le mouvement de l'eau relativement à ce cône, pendant que le flotteur se tient en repos après avoir accroché le mouton à la fin de sa course ascensionnelle, et forme alors, par sa position dans le centre du tuyau, un orifice annulaire au sommet de celui-ci. On peut remarquer que, dans sa course remontante, le frottement de la colonne liquide autour de lui n'est pas entièrement perdu pour l'effet, puisqu'il l'aide à acquérir sa vitesse ascensionnelle jusqu'à l'époque où celle-ci est devenue à peu près égale à celle de cette colonne.

A cause des ballottements du flotteur non guidé dans cet appareil provisoire, et du surcroît de course nécessaire pour faire accrocher sûrement le mouton, qui n'était pas non plus établi très solidement, j'avais donné à l'oscillation remontante plus de force que cela n'eût été nécessaire si l'on avait employé une machine mieux exécutée, et surtout un mode moins défectueux d'application pour le moteur. Il en résultait

une quantité donnée de force vive, que les pressions refoulantes ou motrices sont moindres. Il en serait d'ailleurs résulté que le flotteur aurait pu descendre plus longtemps, même à partir du moment où il aurait rencontré la colonne remontante, parce que, si le tuyau avait été plus gros autour de sa base, il aurait pu y pénétrer plus bas, par la raison même que le liquide refoulé autour de lui aurait eu, pour une course donnée du flotteur, moins de hauteur et moins de vitesse.

que non seulement le flotteur remontait, en général, à $0^m,15$ plus haut que cela n'était nécessaire, mais qu'à chaque période, il rentrait dans le réservoir supérieur une certaine quantité d'eau qui en gonflait visiblement la surface environnante, après avoir traversé deux fois le système en augmentant sans utilité le chemin et l'intensité des résistances passives. Aussi, quand la cuve de jauge achevait de se vider, la machine fournissait un certain nombre de périodes avec un niveau moins élevé dans le bief supérieur et une dépense d'eau bien moindre ; ce qui était même remarqué à la simple vue par tous les observateurs, puisque le robinet de jauge *ne coulait plus plein.*

Lorsque le réservoir ou bief supérieur était entièrement rempli d'eau, la hauteur de son niveau au-dessus de celui du bief inférieur était de $1^m,28$. Mais le réservoir supérieur ayant une étendue limitée, la chute motrice moyenne était nécessairement moindre, puisque sans cela l'eau qui arrivait de la cuve de jauge aurait coulé par-dessus les bords pendant que la soupape était fermée. Il était facile de voir que, surtout si l'on a égard aux ondes qui augmentaient les chances de versement, le niveau moyen, qui eût été à considérer dans un réservoir de largeur indéfinie, n'était pas à plus de $1^m,26$ au-dessus du niveau du bief inférieur, en faisant même abstraction de ce que l'eau montait un peu dans ce bief pendant l'expérience. Cette remarque est sans importance, mais il est bon de se représenter comment les choses se passent le plus exactement possible. On n'arrêtait la machine que lorsque cette hauteur de chute était notablement réduite ; mais nous admettrons d'abord $1^m,26$ de chute.

En considérant seulement quelques oscillations pour des chutes moindres, j'ai trouvé des rendements sur lesquels je donnerai plus loin des détails.

J'ai mesuré directement le poids qui imprimait au flotteur et au mouton suspendus aux deux extrémités de la corde la vitesse nécessaire pour faire décrocher le déclic arrivé au

haut de sa course. Il en résulte que, si l'on mesurait le rendement au point d'application du moteur, et non sur l'outil même, ce qui serait juste, puisqu'on agit ainsi pour apprécier l'effet de tous les autres moteurs, des roues hydrauliques par exemple, il faudrait augmenter ce rendement d'une certaine quantité. Je reviendrai sur ces estimations.

Le mouton, alternativement soulevé, est le moyen le plus direct, mais le plus désavantageux, de mesurer l'effet utile de ce moteur ; car, pour le faire accrocher et décrocher, il faut un surcroît de travail dont il ne serait pas seulement question si le flotteur était *invariablement* attelé à l'outil ; si, par exemple, celui-ci était une pompe, une scie, un soufflet, une grande cisaille, une machine à polir, etc. On voit même que, pour plusieurs de ces applications, dans beaucoup de circonstances, le flotteur pourrait être directement attelé sans poulies de renvoi. Ici les deux poulies étaient en cuivre, leur diamètre était de $0^m,20$, celui de leurs boulons était de $0^m,03$; la corde qui se pliait dessus avait un diamètre $0^m,02$. Elle était souvent mouillée au moment des essais. Les *filets* en bois, le long desquels s'élevait le mouton, avaient une section carrée d'environ $0^m,03$ de côté. Le mouton ballottait quelquefois le long de ces filets, l'appareil étant construit provisoirement avec beaucoup d'économie.

Parmi les expériences, je décrirai particulièrement celle qui a été faite, le 14 octobre 1843, à la dernière séance, celle à laquelle assistait M. Lamé, qui a rédigé le Rapport à l'Institut. On s'était montré généralement satisfait de la première, faite quelques jours auparavant, le 10 octobre. Mais comme il était survenu un accident pendant l'opération, je ne la trouvai pas suffisante pour fixer l'opinion d'une manière définitive ; je demandai à recommencer un autre jour, et l'appareil fonctionna avec la régularité désirable, le flotteur ne sautant plus qu'à $0^m,15$ au-dessus de la limite de sa course ascensionnelle utile. J'ai fait une centaine d'expériences de ce genre. Comme leurs résultats ne varient que de quelques

centièmes, et que leurs différences, dont au reste je rendrai compte, peuvent être attribuées jusqu'à un certain point aux imperfections de l'exécution, je me bornerai à discuter principalement celle qui a reçu la sanction académique, ne pouvant d'ailleurs tenir à quelques centièmes dans l'effet utile d'un appareil d'une installation aussi imparfaite. Il suffit de rappeler en peu de mots le nombre considérable de mes essais, et de dire que le maximum d'effet résultait surtout, comme cela est évident, de l'attention que j'avais d'empêcher autant que possible le flotteur de sauter au-dessus de la limite utile de sa course ascensionnelle.

Voici quelques détails sur la légende des figures, N est le niveau du bief d'amont, N' celui du bief d'aval.

Les lignes ponctuées de la figure 21 montrent le flotteur en P' au haut de sa course et la soupape annulaire levée jusqu'aux points G' et H'. QQ' est une tige de suspension attachée au flotteur. QRST est une corde passant sur les poulies R, S, portant à l'extrémité T un déclic soulevant alternativement un mouton V dont l'autre position est indiquée en V' par des lignes ponctuées.

La ligne ponctuée au-dessous du déclic T indique la place de l'arrêt ordinaire de ce déclic. La ligne ponctuée XY indique la profondeur à laquelle l'eau était descendue avant de remonter. Les guides provisoires de la soupape annulaire, réunis par un petit cercle en zinc, sont représentés en ZZ. Le contrepoids formé de rondelles L et d'une rondelle en zinc est représenté figures 21 et 22. Cette dernière figure montre quelques détails du mode de suspension de la soupape annulaire.

Pour ces expériences, la corde était immédiatement attelée au flotteur, il est bien entendu qu'il faudra, dans la pratique, donner à la tige QQ' la longueur nécessaire pour servir de guide, le flotteur ne devant point ballotter, ce qui était d'ailleurs une cause de déchet pour ce modèle provisoire. Je n'entre pas ici dans ce genre de détails.

Détails de l'expérience du 14 octobre 1843

La cuve de jauge avait au sommet 2m,10 de diamètre intérieur. Elle était formée de madriers rectilignes réunis par des cercles de fer. Ceux-ci étant posés de haut en bas, le diamètre inférieur de la cuve était un peu plus grand. L'expérience a duré neuf minutes, à partir de l'instant où l'on a commencé à compter les périodes devenues suffisamment régulières. Depuis ce moment, l'eau a baissé de 2m,05 dans cette cuve; dans le cas où celle-ci serait rigoureusement cylindrique, le volume débité serait donc de 7,100 mètres cubes en négligeant les dix-millièmes. Mais il est juste de tenir compte de la petite augmentation du diamètre de la partie inférieure dont je viens de parler. Admettant une augmentation moyenne de 0m,05 dans le diamètre comme étant extrêmement près de la vérité, on trouve que la quantité d'eau débitée pendant cette expérience était un peu moindre que 7,45 mètres cubes. Cette petite augmentation m'avait d'abord semblé pouvoir être plus que compensée par des pertes d'eau constatées le long du tuyau de conduite. Mais j'ai reconnu, comme on le verra plus loin, que des différences de déchets observées d'une année à l'autre pouvaient provenir, du moins en partie, de différences dans la nature du frottement, à cause de la manière dont les surfaces peuvent avoir été modifiées par des dépôts dont on devrait tenir compte dans une application définitive. Je néglige donc les pertes d'eau dont il s'agit, afin de ne pas m'exposer à estimer trop haut le rendement.

A partir de l'instant où l'on a arrêté la soupape annulaire pour interrompre l'écoulement du bief supérieur, il a fallu vingt secondes pour fermer le gros robinet-vanne de la cuve. Il était à cette époque entièrement ouvert et ne coulait pas plein à beaucoup près. Mais le temps pendant lequel on a

baissé la vanne était plus que double de la durée d'une période. Il y a eu environ un cinquième de mètre cube qui n'est point entré dans l'appareil, étant ainsi resté dans le réservoir d'amont, ce qui réduit à 7,25 mètres cubes la quantité d'eau dépensée.

Le bassin en zinc et la soupape perdaient un peu d'eau. On a constaté qu'en neuf minutes cette perte était à peu près d'un dixième de mètre cube. Mais comme une partie de cette perte se faisait par la soupape et que celle-ci était entr'ouverte pendant près de la moitié du temps, si l'on admet qu'elle n'était que d'à peu près 0,05 de mètre cube, cela réduit en définitive le débit à 7,20 mètres cubes environ. Cette remarque est d'ailleurs sans importance.

Le nombre de périodes était compté en même temps par plusieurs observateurs, et pour confirmer leurs notes, M. l'inspecteur général Mallet conseilla de jeter, chaque fois qu'on entendait le coup de mouton, une pierre dans un seau. Enfin la machine ayant pour but de relever le flotteur, on a retiré la première pierre et le nombre de celles qui restaient s'est trouvé de 57. Il aurait pu être plus convenable d'en ajouter une, car le flotteur, quand on a arrêté l'appareil, s'est encore relevé presque assez haut pour accrocher le mouton. Nous ferons abstraction de ce petit avantage négligé et nous calculerons le travail recueilli seulement par le produit du poids du mouton V de 55 kilogrammes, élevé cinquante-sept fois à $1^{m},62$, le rapport de ce travail à celui qui est dépensé est donc $\frac{50,787}{90,726}$. De sorte que le rendement diffère très peu de 0,56. MM. les commissaires de l'Institut ont adopté le chiffre de 0,55, ayant négligé la petite perte précitée de 0,05 de mètre cube.

Il y aurait de plus, comme ils l'ont remarqué, à tenir compte des résistances passives du mécanisme additionnel, telles que le frottement des poulies RS, l'inertie du déclic T, etc. On sait, en effet, que c'est par exemple sur l'arbre d'une

roue hydraulique et non sur l'outil qu'elle fait mouvoir qu'on apprécie le rendement.

J'ai donc mesuré directement ensuite le poids nécessaire pour vaincre la résistance des poulies, celle de la flexion de la corde, celle du frottement du mouton le long des guides, l'inertie des poulies et du déclic, etc. J'ai trouvé que ce poids ne différait pas beaucoup d'un dixième à un onzième de celui du mouton, quelquefois un peu moins. Supposons que ce soit seulement un onzième qui soit nécessaire afin d'imprimer au mouton la vitesse indispensable en définitive pour faire décrocher le déclic au haut de sa course. Le rendement dépassait donc 0,60 du travail dépensé.

La vitesse n'étant pas uniformément accélérée, il serait difficile de se rendre compte *a priori* de ce qui arrive quand le flotteur rencontre la colonne liquide remontante. J'ai remarqué que le mouton s'élevait, en vertu de sa vitesse acquise, à environ $0^m,015$ au-dessus de la limite $1^m,62$ admise dans les calculs précédents. Le flotteur, lorsqu'il s'arrête après avoir fait décrocher le déclic, perd une quantité de force vive que l'on peut apprécier approximativement au moyen de ce petit surcroît de hauteur obtenue par le mouton. Il est bien entendu que si le travail à effectuer, celui d'une scie par exemple, n'exigeait pas qu'il y eût ainsi un arrêt brusque, cette petite quantité de force vive ne serait pas perdue.

Mais s'il est intéressant de signaler ces détails de la marche du système, il n'y a pas à en tenir compte dans la manière de mesurer le rendement, telle que nous venons de la présenter. En effet, les vitesses qui restent à la fin de la course au mouton et au flotteur peuvent être considérées comme provenant d'une partie du travail que nous avons estimé à un onzième de celui du mouton. La corde étant tendue pendant l'ascension de ce dernier, on peut admettre, sans être obligé d'entrer dans le détail des variations de vitesses, qu'il a suffi de mesurer, le bassin d'aval étant vide, la différence de poids entre le mouton et le flotteur nécessaire pour soulever le mouton

à une hauteur de $1^{m},62$, avec la vitesse indispensable pour faire décrocher le déclic. Il faudrait encore tenir compte des résistances provenant aussi, quand le flotteur remonte, de ce que la corde, passant au-dessus de la poulie, doit glisser avec la vitesse nécessaire pour que le déclic accroche le mouton. Mais la tension de cette corde est beaucoup moindre que dans l'autre sens du mouvement. Je néglige le petit avantage qui en résulterait pour le rendement si l'on tenait compte de tout.

Un des inconvénients d'employer un mouton afin de mesurer le rendement consiste en ce que, pour être sûr qu'il soit accroché, on est obligé de faire sauter le flotteur à une certaine hauteur au-dessus de la limite qui sans cela suffirait dans une marche régulière. Cet excès de hauteur qui était, comme je l'ai dit, de $0^{m},15$ permet, il est vrai, de refouler un peu d'eau au bief d'amont, quand il retombe jusqu'à son point d'arrêt normal.

Voici un moyen de se former une idée de la limite du rendement qu'on pourrait obtenir même avec l'appareil dans l'état d'imperfection où il était. Au lieu d'amorcer la machine comme je le faisais généralement, par des introductions successives de liquide, ayant d'ailleurs l'inconvénient de faire entrer de l'air dans la colonne oscillante, je fermais le robinet de la cuve, et le réservoir supérieur en zinc étant plein d'eau, j'obtenais deux périodes de la machine après l'avoir mise en train par le moyen indiqué, pages 663 et suivantes.

Le mouton étant accroché et lesté de manière à tenir au besoin le flotteur en équilibre, quand celui-ci était hors de l'eau, je faisais entrer alternativement le flotteur dans le liquide que contenait le tuyau, en tirant sa corde de haut en bas. Je lui permettais ensuite de remonter avec la colonne oscillante jusqu'à ce que celle-ci fût assez élevée pour faire ouvrir la soupape annulaire. L'appareil était alors en train.

On obtenait deux périodes au moyen d'une baisse de $0^{m},09$ dans le niveau du réservoir d'amont. A la seconde, il est vrai, le flotteur que, pour deux périodes seulement, il n'était pas

indispensable de faire sauter aussi haut, ne remontait pas toujours assez pour faire accrocher le mouton. Afin d'y parvenir il fallait, en amorçant la machine, rejeter un peu d'eau dans le réservoir supérieur au-dessus de la limite précitée. Il était difficile de mesurer rigoureusement ce petit exhaussement central qui disparaissait très vite à cause de la levée de la soupape annulaire. Il n'a point paru qu'il ait pu en résulter une épaisseur de plus d'un centimètre moyennement, parce que le réservoir supérieur était plein et ne devait pas déborder sensiblement.

Si l'on admet d'après cela que chaque période dépense une tranche d'eau du réservoir de $0^m,05$ d'épaisseur, celui-ci ayant une section carrée de $0^m,50$ de côté, on trouve que, dans le cas où il n'aurait pas été déformé, si l'on retranche la partie de la section occupée par la soupape annulaire, quand elle est baissée la quantité d'eau dépensée à chaque période serait d'un dixième de mètre cube environ. Mais il faut tenir compte de ce que les parois étant voilées, comme je l'ai dit ci-dessus, cette quantité d'eau était plus considérable. Il ne serait pas d'ailleurs juste pour la première oscillation de retrancher un volume d'eau égal à celui qui est contenu dans la soupape annulaire, puisqu'une partie de cette eau est fournie par la manière dont on a amorcé l'appareil.

N'ayant pas conservé la note sur les véritables sections ainsi déformées, je craindrais d'induire en erreur si je précisais les quantités d'eau ainsi dépensées, tout en donnant les indications précédentes au point de vue des limites. Mais il faut signaler la diminution de la chute motrice dans la dernière période. Pour celle-ci la chute moyenne n'était que de $1^m,215$. Cela est d'autant plus intéressant qu'à la fin de l'expérience, sur laquelle le rendement a été calculé dans le rapport à l'Institut, quand on a arrêté la machine, quoiqu'elle marchât encore régulièrement, la cuve de jauge fournissait une quantité d'eau moindre que dans les premières périodes, et le niveau était notablement baissé dans le réservoir d'amont.

J'évite de m'appuyer sur la partie des résultats qu'on n'a pu préciser, tels que ceux qui provenaient des pertes d'eau quelconques dont une était visible sur un joint du tuyau qui était au-dessus du bief d'aval. Cependant on peut admettre que, si l'on avait employé un moyen de mesurer l'effet n'ayant pas les inconvénients précités du mouton à déclic, on aurait trouvé un rendement d'environ 0,70 d'après les diverses mesures précitées. Mais une partie considérable du déchet provenant du frottement de la colonne liquide, on peut augmenter ce rendement d'une manière importante, même sans avoir égard aux nouvelles proportions indiquées plus loin, en augmentant les diamètres des diverses parties de l'appareil. Je reviendrai sur ces détails.

Etudes sur l'emploi des résistances passives dans ces expériences.

Le frottement provenant du simple balancement de la colonne liquide absorbe une quantité de travail en résistances passives bien plus grande que la somme des autres causes de déchet. Cette remarque, que je vais justifier, est d'autant plus essentielle, qu'il en résulte qu'il suffira d'augmenter dans certaines limites le diamètre du tuyau en L, pour diminuer le déchet total d'une manière importante : c'est le point essentiel des études suivantes.

Abstraction faite de la valeur rigoureuse des coefficients des résistances passives, nous admettons simplement les chiffres fournis par les observations sur le tuyau en L, dans l'état où il était à la fin de ces expériences. Il suffit, pour se rendre compte de l'influence du simple balancement de la colonne liquide sur le déchet total, d'appliquer, avec les modifications dont je vais parler, les formules exposées dans la première partie.

La modification dont il s'agit consiste dans la manière de tenir compte de l'influence exercée sur le travail en frottement, par la présence du flotteur pendant l'ascension de la colonne liquide.

Le flotteur avait une densité plus grande que celle de l'eau; mais il était relevé en vertu de l'action d'un contre-poids qui, joint au déclic et formant ordinairement en tout 14 kilogrammes environ, était indispensable pour le faire remonter. Pour ce sens du mouvement, la corde est bien moins tendue et les résistances passives bien moindres que dans le mouvement en sens contraire; cependant il faudrait en tenir compte: ce qui fait plus que compenser une petite incertitude sur le poids nécessaire pour vaincre ces résistances passives. Les choses étant alors, quant à l'ascension du flotteur, dans un état analogue à ce qui se présenterait s'il avait une densité moindre que celle de l'eau, on va voir que cette ascension permet, en général, au système liquide de développer un peu plus de vitesse que si cette pièce était retenue en équilibre de haut en bas. La surface de la colonne liquide est d'ailleurs, bien entendu, descendue à la profondeur nécessaire pour remonter à la limite de sa course ascensionnelle, malgré la présence du flotteur supposé en repos invariable. Il semble, au premier aperçu, qu'il y a ici un paradoxe; ceci exige quelques développements.

Si le flotteur, descendu au-dessous du niveau du bief inférieur, était supposé dans un repos invariable, il occuperait la place d'un volume de liquide égal au sien; il faudrait donc que le niveau de la colonne oscillante partît de plus bas que dans l'hypothèse où le flotteur n'existerait point pour arriver au haut de sa course, puisqu'en vertu de l'occupation permanente de l'espace dont il s'agit, il resterait à l'eau qui revient du bief d'aval moins de chemin à parcourir pour développer sa force vive.

Mais si l'on suppose que le point de départ de la colonne soit à une profondeur convenablement calculée d'après la

remarque précédente, et que l'on fasse, pour un moment, abstraction des résistances passives, la densité du flotteur étant, par hypothèse, moindre que celle de l'eau, son ascension est une cause d'addition de force vive au système, parce qu'en s'élevant, il fait passer de l'eau à la place qu'il abandonne. Il est clair que, s'il était dans un vase plein d'eau en repos, son ascension ferait descendre le centre de gravité du système. Enfin, pour ne laisser aucun nuage sur la manière dont le travail se distribue en vertu de cette ascension dans la colonne liquide oscillante, il suffit de remarquer que, lorsqu'elle est finie, l'espace occupé primitivement par le flotteur est rempli d'eau. Or, celui ci se trouve alors en entier au-dessus du niveau du bief inférieur; et comme le niveau de la colonne liquide oscillante était parti de plus bas que lorsqu'il n'y avait pas de flotteur, il y a eu, en définitive, plus d'espace envahi par le liquide au-dessous du niveau du bief d'aval; cela rend compte de la raison pour laquelle cette pièce a pu être soulevée malgré le travail résistant de son poids.

L'expérience prouve que, dans l'intérieur de la colonne liquide, le flotteur ne monte point par soubresauts; il serait donc rigoureux de tenir compte, dans le calcul du travail en frottement, du surcroît quelconque de force vive qui pourrait provenir, comme je l'ai expliqué, du mode d'action du flotteur pendant son ascension, parce qu'à une augmentation de force vive correspond une augmentation de résistances passives dans le balancement de la colonne oscillante. Mais comme la différence de densité entre l'eau et le flotteur n'était pas très grande, et que celui-ci finissait par avoir, en général, une vitesse analogue à celle de l'eau qui l'enveloppait, cette remarque est plus intéressante pour la théorie que pour l'estimation réelle des effets de la machine. D'ailleurs, les résistances passives occasionnées par le flotteur, surtout dans les premiers instants de sa rencontre avec la colonne remontante, diminuent d'une quantité quelconque

les vitesses du système; il y a des effets de résistances passives compensés, en quelque sorte, dans des calculs qui ne porteraient que sur des quantités très secondaires ici, et d'une détermination trop délicate pour mériter d'être étudiées en ce moment relativement à cette expérience.

La correction à faire sur la profondeur de l'oscillation, dans le calcul du déchet, à cause du mouvement du flotteur, ne provient point de l'oscillation descendante, puisque celui-ci ne fait guère que suivre la colonne liquide dans le sens de ce mouvement. La dernière moitié de l'oscillation descendante est parfaitement dégagée du flotteur; mais il faut tenir compte, dans la première moitié, de la manière dont se distribuent la valeur et le chemin des résistances passives. La hauteur de l'eau qui engendre de la vitesse dans le tuyau pendant que l'eau motrice y pénètre est moindre que la hauteur moyenne d'où celle-ci partirait, si le tuyau était prolongé en dessus, et qu'elle en descendît pour produire la même vitesse, au lieu de sortir du bief supérieur. Il faut en tenir compte dans l'application des formules. Il y a une considération en sens contraire provenant de ce que le flotteur suspendu occupant un certain volume au-dessous du niveau du bief supérieur, la quantité d'eau sortie de ce bief pour engendrer la force vive qui le serait par un égal volume d'eau, si le flotteur était enlevé, descend d'une hauteur plus grande que celle du centre de gravité de ce dernier.

Ces considérations sont intéressantes à cause des différences qui en résultent dans les chemins des résistances passives. On verra mieux, d'ailleurs un peu plus loin comment on doit appliquer la note de la page 153.

Pour appliquer à l'oscillation remontante des formules que je rappelle au commencement de ce paragraphe, il faudrait réduire les choses au degré de simplicité où elles seraient si, le flotteur étant supprimé, la colonne liquide partait de la profondeur nécessaire pour avoir, en arrivant à la hauteur du niveau du bief d'aval, à peu près la quantité de force vive

qu'elle doit avoir après être partie de plus bas, quand on suppose le flotteur invariablement fixé à la limite inférieure de sa course. Cette détermination est facile à obtenir au moyen des principes que j'ai exposés dans la première partie. On trouve d'ailleurs, d'après les mêmes principes, que le calcul du déchet établi de cette manière peut être plutôt au-dessus qu'au-dessous de sa véritable valeur, à cause de la manière dont la présence du flotteur modifie le chemin parcouru par les résistances passives. Ainsi, il y a diverses causes de compensation, et, en définitive, on peut se servir, dans une simple approximation comme celle dont il s'agit, de mes formules sur le mouvement oscillatoire dans les tuyaux cylindriques indéfiniment prolongés dans le sens vertical. Mais il faut avoir égard à la manière de les employer que j'ai indiquée, et se servir, pour déterminer la somme des coefficients des résistances passives qui se présentent dans le simple balancement de la colonne liquide, des observations *directes* faites sur le déchet dans la hauteur de la colonne remontante, lorsqu'on a ôté le flotteur à la fin des experiences.

Quant aux irrégularités secondaires qui résultent nécessairement du principe de l'oscillation, elles se réduisaient à peu de chose lorsque la machine était bien réglée et en assez bon état. Si les spectateurs ne regardent pas monter le flotteur dans l'intérieur du tuyau en L, ils peuvent craindre qu'il n'y ait des soubresauts, à cause de ce qui se passe à la limite de l'ascension, mais il n'en est pas ainsi; seulement, à la fin de celle-ci, le flotteur monte à une certaine hauteur au-dessus du point où cela est nécessaire, pour accrocher plus sûrement le mouton. Or il est indispensable de faire observer que, dans le cas où il s'agirait de faire fonctionner un outil qui serait toujours attelé au flotteur, ce soubresaut, qui est dans ce modèle un défaut essentiel, serait *impossible*. En effet, la résistance industrielle tiendrait le flotteur *suspendu*, si, par hypothèse, elle ne pouvait être surmontée que par presque tout le poids

du flotteur, découvert en vertu de la descente ultérieure de la colonne liquide.

A l'époque où la colonne remontante rencontre le flotteur, qui descend encore, il se présente un bouillonnement momentané autour de son cône inférieur, et, par suite, une cause quelconque de ballottement dans le flotteur, quand il n'est pas guidé. Mais il est clair que, s'il l'était, cette cause peu importante de perte de travail serait sans inconvénient, et se confondrait avec celles dont l'effet est alternativement *restitué* en vertu de l'augmentation de profondeur dans le point de départ due à une dépense d'eau motrice plus considérable que cela ne serait nécessaire si l'on n'avait pas à tenir compte des irrégularités *éventuelles*. La limite de celles-ci sera déterminée, bien entendu, dans chaque machine, et, lorsqu'elles ne se présenteront pas, il rentrera à chaque période, dans le bief supérieur, une partie du surcroît de débit destiné à y avoir égard dans tous les cas, pour que l'appareil ne soit jamais arrêté, excepté dans des circonstances très rares, ainsi que cela arrive pour toutes les machines hydrauliques.

Je n'entrerai pas ici dans le détail des calculs, n'ayant pour bût que d'exposer des principes. Voici, au reste, les données numériques au moyen desquelles le lecteur pourrait facilement vérifier le résultat principal.

Ayant retiré le flotteur du système, j'ai mis la colonne liquide en oscillation par l'introduction alternative d'une tranche de liquide, en soulevant alternativement la soupape, comme je l'ai dit plus haut. Je la tenais ensuite invariablement fermée, lorsque la colonne remontante avait versé par dessus ce *tuyau-soupape*, en passant par l'espace libre à son intérieur; car il faut toujours se souvenir que les choses sont disposées de manière à ne jamais boucher *transversalement* le tuyau. Je laissais retomber la colonne liquide, la soupape étant toujours fermée, c'est-à-dire son anneau inférieur reposant invariablement sur le siège annulaire fixe, et je notais la hauteur à laquelle parvenait la colonne remontante. Je crai-

gnais d'abord que l'air introduit dans le liquide par le mode de mise en train n'altérât notablement les résultats, cela faisait évidemment quelque chose; mais les bulles d'air du sommet de la colonne paraissaient, en définitive, peu importantes. D'ailleurs, j'ai répété un grand nombre de fois cette experience, en retrouvant toujours assez sensiblement le même déchet à cette époque de mes essais. Or, il est probable qu'il n'en aurait pas été ainsi dans le cas où les bulles d'air, introduites d'une manière nécessairement peu uniforme, auraient eu une influence essentielle sur les effets. Quoi qu'il en soit, voici le résultat d'après lequel j'ai fait un essai de calculs numériques.

L'eau remontait à $0^{m},22$ du sommet du *tuyau-soupape*. Pour apprécier ce déchet, il faut se souvenir que le diamètre intérieur de ce tuyau n'était que de $0^{m},36$, tandis que le diamètre était de $0^{m},40$ au-dessous du siège de la soupape. Afin de tenir compte des plus petites circonstances, on peut ajouter que le diamètre $0^{m},36$ ne commençait même qu'à $0^{m},03$ au-dessus du siège de la soupape. L'eau redescendait à $2^{m},70$ au-dessous de son premier point de départ supérieur, avant de remonter ainsi, ce qui fait $1^{m},26$ de baisse au-dessous du niveau du bassin inférieur, dans le tuyau de $0^{m},4$ de diamètre.

Il eût été à désirer que l'on pût mesurer exactement la profondeur à laquelle la surface de l'eau descendait lorsque le flotteur était en jeu dans le tuyau vertical, et qu'en un mot la machine fonctionnait comme à l'ordinaire. Mais le mouvement du flotteur, qui n'était pas guidé dans cet appareil d'essai, empêchait d'enfoncer une perche pour prendre cette mesure, comme on l'avait fait, à environ un centimètre près, quand on avait enlevé le flotteur pour étudier le libre balancement de la colonne liquide. D'ailleurs, la surface de la colonne était *brisée*, parce qu'elle descendait alors dans le coude jusqu'à la profondeur à laquelle on commençait à la perdre de vue. J'ai tâché de reconnaître cette profondeur en

remarquant que la surface brisée se trouvait sur le joint du premier et du second tuyau courbe, qui formaient le coude en quart de cercle disposé entre le tuyau horizontal et le tuyau vertical. La longueur développée de l'axe du tuyau abandonnée au-dessous du niveau d'aval par la colonne oscillante n'était pas de plus de $1^m,80$ environ, et encore il faut tenir compte de ce que le bas du tuyau arrondi, formant plus de la moitié de cette longueur, se trouvait à une profondeur un peu moindre que s'il avait été rectiligne.

Nous connaissons par des expériences directes le déchet de la colonne remontante, partie d'une profondeur de $1^m,26$ au-dessous du niveau d'aval. Nous savons, d'après ce qui a été dit sur l'influence du flotteur, que, pour l'ascension de la colonne, le travail en frottement paraît différer peu de ce que nous avons trouvé en supprimant ce flotteur. Il suffit de se rappeler que, si ce dernier était maintenu en repos, la colonne partant d'une profondeur calculée d'après la présence de cette pièce, une quantité déterminée du tuyau devrait être remplie au-dessus du niveau d'aval par la colonne liquide.

Pour se former une idée approchée du déchet provenant de l'oscillation descendante suivie par le flotteur, il suffirait, d'après ce qui a été dit, d'observer directement le déchet à une époque où le niveau d'aval serait assez bas pour que l'oscillation eût une amplitude analogue au double de la demi-oscillation observée au-dessous du niveau d'aval, à l'époque où la machine était en train. C'était ce que j'avais fait à une époque antérieure; mais le tuyau n'était pas dans les mêmes conditions que lorsque je mesurai l'effet utile de l'appareil, ainsi que je l'expliquerai plus loin. Comme j'ai seulement pour but d'indiquer une vérification sur l'état définitif de la machine, je me contenterai de rappeler qu'en général, lorsque les amplitudes des oscillations ne sont ni trop différentes entre elles, ni trop grandes relativement au diamètre du tuyau, le rapport du déchet en hauteur de la colonne remontante dans un tuyau vertical d'égal diamètre

partout suffisamment prolongé, à la profondeur du point de départ au-dessous du niveau d'aval, est à peu près en raison inverse de cette profondeur, toutes choses égales d'ailleurs, d'après les expériences que j'ai rapportées dans la première partie. Ici l'ascension aurait eu assez de puissance pour rejeter une certaine masse d'eau dans le bief supérieur, si le flotteur avait été supprimé, puisque la rentrée de cette eau aurait tenu lieu du travail résistant du poids du flotteur pendant qu'on le relevait. Ainsi, dans un tuyau vertical suffisamment prolongé, la colonne serait, malgré le déchet, montée à une certaine hauteur au-dessus du niveau du bief d'amont. Cependant il est facile de voir que la portion du tuyau que n'aurait pas, à cause du déchet, remplie la colonne remontante à son sommet, ne serait pas, en définitive, ici à une hauteur beaucoup plus grande que le niveau du bief d'amont, dans le cas où le tuyau vertical serait de même diamètre partout, au lieu d'être rétréci sur une longueur de $0^m,47$ par la soupape annulaire. Or, cela est très commode pour se former une idée du déchet total provenant des deux oscillations, ou du simple mouvement de la colonne liquide, à cause des compensations qui résultent d'ailleurs de ce qu'une partie du tuyau, vertical par hypothèse, était inclinée à l'origine du coude.

Je ne m'étendrai pas cependant ici sur la vérification du travail résistant provenant de ce balancement, en ne faisant reposer mes calculs que sur la mesure directe de la profondeur à laquelle le niveau *brisé* de la colonne oscillante était descendu, parce que cette mesure directe laisse, comme je l'ai dit, un peu d'incertitude. Mais j'ai pensé qu'il ne serait pas sans quelque intérêt d'indiquer les considérations précédentes qui permettent d'étudier la question sous divers points de vue. En définitive, on peut, si ce genre de vérification paraît utile, appliquer ici de plusieurs manières les formules sur les oscillations des liquides que j'ai établies dans la première partie, en déterminant les coefficients au moyen des

observations directes faites sur le tuyau de la machine, à l'époque où j'ai plus complètement mesuré l'effet utile. On trouvera que les résistances passives dûes au simple balancement de la colonne peuvent avoir absorbé 1/4 ou 1/5 environ du travail de la chute, selon que l'on considèrera les diverses limites de cette chute sous lesquelles la machine a fonctionné. Je reviendrai d'ailleurs sur ce sujet dans le paragraphe suivant, en rapportant des expériences plus spéciales, dans le simple but de faire encore mieux concevoir l'état de la question, et en prévenant toujours qu'il ne faut attacher à ces moyens de vérification qu'une importance secondaire. Peut-être n'en aurais-je dit que quelques mots si la machine avait été mieux construite; mais l'imperfection même de l'exécution m'oblige de l'étudier sous divers points de vue.

Il y a plusieurs autres causes de perte de travail, abstraction faite du mode d'application du moteur :

1° A la fin de l'ascension de la colonne remontante, il s'exerce de bas en haut une percussion, insignifiante il est vrai, sur le rebord intérieur du *tuyau-soupape*. Dès l'instant où celui-ci commence à se soulever, l'eau du bief supérieur entre sur la colonne remontante, et l'aide à se remettre de niveau avec ce bief. Cette quantité d'eau était d'ailleurs très petite, ainsi que la hauteur moyenne dont son centre de gravité descendait au-dessus du seuil de la soupape. Il est facile de s'en rendre compte, surtout si l'on a égard à ce que, le flotteur cylindrique occupant à cette époque le centre de la soupape annulaire dont la section intérieure est déjà moindre que celle du tuyau, le volume annulaire de liquide dont il s'agit ne donne lieu qu'à un déchet insignifiant, en contribuant à rétablir le niveau, comme on vient de le dire.

2° La soupape étant convenablement équilibrée, le travail nécessaire pour la faire fonctionner est de peu d'importance; comme elle se baisse très vite, la perte de force vive de la tranche annulaire qu'elle coupe est très petite. Quant à la colonne en mouvement dans le tuyau en L, ses sections *trans-*

versales ne peuvent jamais être bouchées. Il n'y a d'intercepté que le mouvement de l'eau affluente dans l'intérieur du réservoir supérieur en zinc, ce qui ne donne évidemment lieu qu'à une quantité de perte de force vive très petite par rapport à l'ensemble du système en mouvement. Cette eau, dont la direction est changée par la soupape annulaire, a d'ailleurs toute la liberté possible pour produire des ondes dans le bassin supérieur, sans donner lieu à aucune chance de *coup de bélier*.

3° La *contraction* de la veine liquide, à son entrée du bief d'amont dans le tuyau, ne pouvait être que partielle; en effet, la soupape étant suffisamment levée, il n'y avait aucune cause de contraction sur le pourtour central formé par le flotteur cylindrique suspendu au haut de sa course. Il n'y en avait, à proprement parler, que sur le pourtour extérieur du siège de la soupape; et encore elle était diminuée par un entonnoir en zinc qui n'avait, d'ailleurs, qu'une forme provisoire, son côté ayant une inclinaison sur l'horizontale d'environ la moitié d'un angle droit, et sa hauteur étant de $0^m,18$ à $0^m,20$. Au reste, je ne me suis pas aperçu que cet entonnoir eût une influence bien sensible sur le résultat définitif; car, dans des expériences sur une machine d'une exécution si imparfaite, je ne sais trop si l'on doit tenir bien sérieusement compte d'une période de plus ou de moins, quand on en compte une soixantaine à partir du moment où elles sont bien régulières. Je dois dire aussi qu'au-delà de certaines limites, la grandeur de l'ouverture de la soupape était sans importance : ainsi, je ne me suis pas aperçu qu'une levée de $0^m,11$ donnât un effet utile sensiblement moindre qu'une levée de $0^m,22$, ou que les levées intermédiaires, la largeur de l'orifice annulaire étant de $0^m,06$. Enfin, quand le flotteur n'était pas dans le centre du tuyau, et en touchait presque la circonférence, il n'en résultait pas de différence appréciable.

4° Pendant toute la durée de l'introduction du liquide par

la soupape, il y a un surcroît de frottement dans le tuyau annulaire d'une très petite longueur, formé par les deux tiers environ des parois verticales du flotteur, suspendu à cette époque d'une manière fixe, et par les parois du tuyau de la machine. Ce surcroît est peu important. A la sortie de ce tuyau annulaire, la veine se dilate dans le tuyau vertical de $0^m,40$ de diamètre. Les lois de la perte de force vive, dans ce genre de dilatation, ou *évasement*, ne sont pas généralement connues. On ne sait pas bien suivant quelles courbes se dirigent les filets, dans les circonstances surtout où il y a lieu de penser, à cause du cône inférieur, que la dilatation n'est pas très brusque. J'ai traité cette question dans la première partie, pages 111 et suivantes. On y voit quelle est la limite du maximum de perte qui peut en résulter.

5° J'ai déjà parlé des pertes de force vive occasionnées, pendant quelques instants, par la rencontre du flotteur dans sa descente, et de la colonne liquide dans son ascension, en faisant remarquer qu'il y avait des causes de compensation assez intéressantes, par suite desquelles je n'en ai pas tenu compte dans cette approximation. Pour bien étudier la nature des effets qui se présentent à cette époque, il faut voir que la colonne est d'abord obligée de prendre un surcroît de vitesse de bas en haut dans l'espace annulaire compris entre cet appareil et le flotteur, qui, dans les premiers instants de la rencontre, a une vitesse en sens contraire. Or, les parois cylindriques de ce flotteur forment un véritable tuyau annulaire dont la longueur frottante est variable jusqu'à ce que cet espace soit rempli d'eau ; et pendant que ce dernier se remplit, il y a une *contraction* de la veine liquide de bas en haut, diminuée, il est vrai, par la présence du cône disposé à l'extrémité inférieure du flotteur. Enfin, quand celui-ci est assez plongé, il tend à prendre une vitesse accélérée de bas en haut, et, à une certaine époque, il monte à peu près, en général, comme s'il faisait partie du liquide. Cependant sa vitesse définitive le fait nécessairement émerger à la fin de

sa course. Dans plusieurs expériences, je l'ai même vu sortir de l'eau en vertu de sa vitesse acquise, bien avant que la colonne liquide eût achevé son ascension. Cette circonstance, dépendante de la manière dont le flotteur est lesté par lui-même ou par son contre-poids, ne paraissait pas avoir d'influence notable sur le résultat définitif. On peut remarquer que son frottement, à cette époque, et l'effet de *poupe* qui résultait de sa forme, donnaient lieu à une perte quelconque de travail. Mais tout cela est sans beaucoup d'importance, ces effets ne paraissant influer sérieusement que pendant des fractions assez petites de la durée totale. J'ai déjà fait remarquer que l'ascension du flotteur au-dessus de la limite de la colonne liquide n'était point, en général, une cause de déchet *absolu*, dans toutes les circonstances où il ne pouvait pas retomber avant d'être suffisamment découvert par le mouvement de haut en bas de cette colonne. C'est ce qui aura lieu, en général, dans l'application du moteur aux *outils* quelconques à mouvement alternatif, mais qu'il ne faudra pas *accrocher alternativement*.

En définitive, si l'on réunit toutes les causes secondaires de perte de force vive ou de travail, distinctes de celle qui est occasionnée par le simple balancement ou le mouvement général de la grande colonne liquide, on ne trouve qu'une assez petite fraction du travail de la chute d'eau. Cela confirme les résultats obtenus au moyen des mesures diverses dont j'ai rendu compte dans le paragraphe précédent.

Il faudrait maintenant pouvoir démêler les différentes espèces de causes de déchet qui se présentent dans le mouvement général de la colonne liquide, puisque c'est là que se trouve la plus grande partie du travail en résistances passives. Je vais donner une idée des tentatives que j'ai faites à ce sujet, dans le but d'en conclure les modifications qui doivent augmenter l'effet utile.

Etude plus spéciale des résistances passives relativement à la détermination du diamètre du tuyau.

Le tuyau horizontal était couché dans l'angle du bassin de Chaillot, parallèlement à l'arête de cet angle, de sorte que l'eau qui sortait par son extrémité d'aval ne pouvait pas s'étendre librement de deux côtés. Ce tuyau était porté sur des tasseaux d'une petite hauteur, et il était d'ailleurs très près du mur vertical, auquel il était parallèle. En un mot, un ajutage divergent de $4^m,4$ de côté, qui s'enfonçait par, son extrémité la plus étroite, dans le tuyau de $0^m,40$ de diamètre intérieur à peu près le même, et dont l'autre extrémité avait un diamètre double, ou de $0^m,8$, s'appuyait, par cette dernière, contre le fond et la paroi verticale du bassin. Il était un peu déformé par son poids. Il semblait résulter des expériences de Venturi, de M. Eytelwein et de celles que j'ai faites sur les oscillations de l'eau dans d'autres conditions, que cet ajutage devait augmenter l'effet. Mais quand je l'ai ôté, je n'ai remarqué aucune différence sur les $0^m,22$ de déchet dans la colonne remontante, au sommet de la soupape annulaire, dont il faut se souvenir que le diamètre intérieur n'était que de $0^m,36$.

En démontant l'appareil, j'ai d'abord fait enlever les dix derniers mètres du tuyau horizontal; j'ai trouvé que le déchet, dans la hauteur de la colonne remontante, était à peu près le même, et qu'il était plutôt diminué, étant réduit à une hauteur de $0^m,21$ au plus. Ce résultat est important; car, pour des diamètres considérables, de grandes longueurs de tuyaux seraient dispendieuses. J'ai encore trouvé que l'ajutage divergent n'avait aucune influence sensible pour cette

longueur du tuyau, les dispositions à la sortie étant les mêmes que précédemment.

Ici il se présente une difficulté provenant de ce que, si, pour les oscillations de l'eau, la longueur des surfaces frottantes d'un tuyau de diamètre donné est sans influence sensible, en supposant ce frottement principalement proportionnel aux carrés des vitesses, les causes *locales*, telles que les contractions, les coudes, les évasements, etc., ont d'autant plus d'importance quant à la perte de force vive totale que les vitesses sont plus grandes. Or, la durée des oscillations trouvée par expérience était à peu près égale à celle des oscillations d'un pendule ayant la longueur développée du tuyau plongé, et la plus grande était de $23^{m},4$ environ. Il en résulte que les vitesses ne semblaient pas assez petites pour que l'un des coefficients de la résistance passive des parois, supposée, par Prony, proportionnelle aux simples vitesses, eût ici une influence très notable par rapport aux autres causes de déchet. De sorte que les différences de ce coefficient, provenant de celles des longueurs du tuyau, ne pourraient servir à expliquer seules comment il se fait que le déchet soit plutôt diminué qu'augmenté par la diminution de la longueur du tuyau, si la perte de force vive, à la sortie de celui-ci, et en un mot, à l'extrémité d'aval, était considérable.

Quelques explications sont donc nécessaires. On admet généralement l'utilité des ajutages divergents à l'extrémité des tuyaux de conduite, ainsi qu'on le voit d'ailleurs dans des rapports à l'Institut que j'ai déjà cités. Je me suis conformé, relativement à beaucoup de cas, à cette opinion qui, pour le mouvement permanent, repose sur des expériences très connues, dans les circonstances où l'avantage qui peut en résulter n'est pas trop petit par rapport aux autres causes de déchet.

Quant au mouvement oscillatoire, j'ai constaté son utilité pour le cas d'un tube vertical dont la longueur n'est pas trop grande relativement à l'amplitude de l'oscillation. Mais

dans le tuyau de conduite qui a servi aux expériences précitées sur le flotteur oscillant, j'ai été très étonné de voir que l'ajutage précité n'avait aucune influence sur l'amplitude de l'oscillation de la colonne liquide abandonnée à elle-même, quand on ôtait le flotteur, afin de faire cette étude spéciale, l'amplitude de l'oscillation étant d'ailleurs moindre dans ce cas, pour la hauteur normale du bief inférieur, telle qu'elle était réglée à l'époque des expériences officielles précitées. Cela ne prouve pas qu'il soit sans effet pour les oscillations faisant sortir en aval des volumes d'eau plus considérables par rapport aux dimensions de l'ajutage. Dans les expériences de M. Vallès, mentionnées pages 489 et 490, le déchet est beaucoup plus grand dans un sens du mouvement que dans l'autre, ce qui semble dépendre de l'ajutage qui débouche dans l'écluse de l'Aubois.

Il est d'autant plus intéressant de chercher la cause de ce paradoxe apparent quant aux expériences de Chaillot, que l'ajutage divergent semblait devoir agir non seulement sur le mode de sortie du liquide, mais sur le mode de sa rentrée du bief d'aval dans le tuyau. Il est vrai que l'extrémité de celui-ci était un peu élargie pour cette espèce de tuyaux, dits à *emboîtement*. La bouche de sortie avait par cette raison un diamètre intérieur de $0^{m},06$ de plus que le reste du tuyau de $0^{m},40$. Or, les carrés des vitesses sont en raison inverse des quatrièmes puissances des diamètres. Mais cette condition même jointe à l'épaisseur des parois du tuyau de fonte, bien plus grande que celle des parois de l'ajutage en zinc et à la proximité du fond du réservoir d'aval et d'un de ses murs verticaux, ne semble pas suffire pour expliquer l'inutilité de l'ajutage. Dans les conditions dont il s'agit, il y avait il est vrai, ce qui influait sur l'un et l'autre, sens de mouvement oscillatoire, une petite solution de continuité entre ses parois et celles du tuyau de fonte où il entrait à frottement sans *garniture*. Mais l'étranglement provenant de ce qu'il pénétrait ainsi dans le tuyau était tout à fait insignifiant. Je re-

viendrai sur cette partie du phénomène. On conçoit aussi que des petites pertes d'eau peuvent modifier les effets.

Il paraît en définitive bien établi que, pour des oscillations de l'amplitude précitée dans ce tuyau de conduite, l'ajutage dont il s'agit ne pouvait avoir d'influence sur les hauteurs successivement obtenues par la colonne liquide remontante que dans les limites des erreurs possibles des observations. Il faut d'ailleurs, comme je l'ai dit, bien se garder d'appliquer ce résultat à des circonstances qui seraient très différentes. Il est intéressant de considérer les diverses conditions des phénomènes pour étudier la cause de ces effets, qui ne paraissent pas dépendre seulement de la grandeur des dimensions de cet ajutage comparé à celui de Venturi, pour un angle analogue.

Quant au sens du mouvement où l'ajutage est considéré comme divergent, l'action sur l'eau qui entoure la bouche d'aval résulte non-seulement de chaque tranche qui sort du tuyau, mais de ce que celle-ci est poussée par la longue colonne liquide en mouvement derrière elle. La vitesse partant de zéro s'accroît graduellement. Il peut s'exercer de divers côtés, tout autour de la bouche de sortie, des pressions de dedans en dehors.

Le cas est très différent de celui d'une colonne d'eau sortant rapidement d'un tuyau vertical, sans avoir à agir sur l'inertie d'une colonne liquide d'une assez grande longueur. Tout le monde peut s'assurer, au moyen d'une cheminée de lampe ordinaire remplie d'eau et débouchée subitement avec la main, étant en partie enfoncée dans un réservoir par le bout qui n'est pas élargi, que la perte de force vive, résultant de ce qu'il reste de la vitesse au liquide à sa sortie au pied du tuyau, est très grande, tandis qu'elle est très petite quand l'extrémité inférieure d'un tube de mêmes dimensions est convenablement évasé. Le cas est aussi très différent de celui d'un cours d'eau permanent qui traverse un réservoir dont les molécules près de l'orifice du tuyau, sont, comme je

l'ai dit attirées de dehors en dedans, au lieu d'être repoussées ainsi que je viens d'expliquer que cela devait être à Chaillot pour l'oscillation de l'amplitude précitée.

Quand les vitesses diminuent, la colonne liquide pour l'hypothèse dont il s'agit continue à pousser l'eau dans l'intérieur du réservoir d'aval. On conçoit donc qu'il est rationnel de penser que, dans le mouvement oscillatoire, pour les conditions dont je viens de parler, quand son amplitude ne dépasse pas certaines limites par rapport au diamètre du tuyau, la vitesse de l'eau dans le réservoir n'est pas perdue entièrement comme elle le serait dans d'autres circonstances. Il est possible qu'elle tende plus ou moins à agir sur l'extrémité du tuyau, d'une façon ayant quelque analogie avec ce que ferait le piston d'une pompe aspirante, à cause de la manière dont elle peut *rayonner* de tous côtés, si l'on peut s'exprimer ainsi.

Quant à l'autre sens du mouvement, quoique la contraction soit très diminuée par la forme de la bouche du tuyau et sa position précitée, il est plus difficile de se rendre compte de ce que l'ajutage, regardé alors comme convergent, ne diminue pas assez sensiblement la perte de force vive pour se manifester dans la somme des autres causes de déchet, quoique l'eau entre avec bien moins de vitesse par le grand diamètre double de celui du tuyau, que dans le cas où cet ajutage est supprimé.

La longueur de celui-ci n'ayant pas, comme je l'ai expliqué, la même influence que dans le mouvement permanent, on doit profiter pour diminuer la contraction de la veine de tous les avantages que ses dimensions peuvent procurer. Il est d'ailleurs inutile de reproduire ici les considérations présentées dans la première partie sur la manière dont ces phénomènes peuvent être modifiés dans le mouvement oscillatoire.

En résumé, s'il résulte de ces expériences que, dans certaines limites, il soit inutile de disposer un ajutage divergent dans des conditions qui peuvent diminuer les causes de dé-

chet dont il s'agit, elles ne sont pas suffisantes pour préciser ces limites. Jusqu'à ce que ces faits singuliers soient plus complètement approfondis, il sera prudent de conserver les ajutages de ce genre et même d'en exagérer la longueur d'après les principes exposés dans cet ouvrage.

Il est bien entendu que l'utilité des ajutages divergents plongés n'est pas mise en doute pour les circonstances où la perte de force vive à la sortie de l'eau d'un tuyau est incontestable. Mais il s'est manifesté dans les expériences dont il s'agit un mode d'action, tout à fait imprévu, de la force vive restant à l'eau après sa sortie, et qu'on devait croire perdue pour l'effet à produire. Cet effet ne se manifestera sans doute que dans des limites assez restreintes, il est donc convenable, tout en le signalant, de rappeler que, dans beaucoup de circonstances, on pourra toujours compter sur une atténuation importante de la perte de force vive de l'eau à sa sortie d'une conduite par un mouvement oscillatoire, quand un ajutage divergent plongé dans le liquide sera assez long pour que les vitesses y varient par degrés insensibles.

J'ai comparé les expériences sur le déchet pour toute la longueur du tuyau horizontal, à celles que j'avais faites, l'année précédente, sur le même tuyau, avant d'avoir étudié la machine aussi complètement que je le désirais. Je me suis aperçu qu'il y avait des différences qui m'ont paru difficiles à expliquer sans quelque détérioration de ce tuyau, provenant principalement peut-être de ce que. pour cet appareil provisoire, les joints n'avaient pas été faits avec assez de soin, comme on s'en est d'ailleurs aperçu pour plusieurs en les démontant. J'ai craint que ces différences ne vinssent en partie de ce qu'à cette époque, je n'avais peut-être pas encore bien saisi le mouvement nécessaire pour mettre la colonne en oscillation, sans y introduire trop de bulles d'air. J'ai donc con-

sidéré le résultat d'un certain nombre de périodes successives. résultat qui s'est trouvé assez sensiblement constant pour rassurer, au moyen d'ailleurs de certaines causes de compensation, sur les chances d'irrégularité provenant de ces *bulles*. Ainsi, pour un même niveau du bief d'aval au commencement de l'expérience, en 1843, il fallait que la colonne remontât trois fois, après être descendue du sommet bien rempli du tuyau, pour que la surface de la colonne remontante laissât entièrement vide le *tuyau-soupape*, alors fixe, de $0^m,47$ de long et de $0^m,36$ de diamètre intérieur, sans parvenir sensiblement au-dessous ni remonter sensiblement au-dessus de l'origine de ce tuyau-soupape, à la troisième ascension. En 1842, il fallait près de quatre périodes pour obtenir le même résultat. En 1843, la baisse, après deux périodes, était de $0^m,33$, et, en 1842, de $0^m,27$ à $0^m,30$, ou de $0^m,40$ au plus pour trois périodes. Enfin, pour une baisse ultérieure de $0^m,30$, il fallait encore trois périodes, en 1843, tandis que, en 1842, trois périodes ultérieures ne donnaient lieu qu'à une baisse d'environ $0^m,16$; et, pour retrouver la baisse de $0^m,30$, il en fallait environ six. A partir à peu près de l'arête inférieure du tuyau de $0^m,36$ de diamètre, sept périodes augmentaient le déchet d'environ $0^m,53$ en 1843, tandis qu'il en fallait à peu près le double en 1842.

Les imperfections quelconques du tuyau, qui me paraissaient mises en évidence par la comparaison de ces deux séries d'observations, empêchent d'attacher beaucoup d'importance, quant aux limites, au détail des périodes intermédiaires et même aux chiffres définitifs. S'il est permis d'affirmer que la somme des coefficients des résistances passives est moindre, dans certaines circonstances, pour le mouvement oscillatoire que pour le mouvement uniforme, il faut attendre que l'on connaisse un plus grand nombre de faits pour en tirer des conséquences générales sur la valeur rigoureuse de ces coefficients. On ne saurait être trop circonspect dans l'étude des faits qui se rattachent aux phénomènes encore si peu

connus des mouvements moléculaires. Aussi, je me contente de considérer, dans la plupart de mes recherches, comme offrant d'ailleurs un maximum, les chiffres adoptés par Prony pour ces coefficients dans le mouvement uniforme, quoi que j'aie déjà réuni des expériences assez concluantes.

Quant à ce qui concerne plus spécialement l'étude de cette machine, je ferai remarquer qu'en 1842, les tuyaux qui même n'étaient probablement pas à beaucoup près en bon état, les joints ayant été faits, pour ces essais, d'une manière tout à fait provisoire, ont donné, au moins pour les premières périodes, celles qui ont été étudiées avec le plus de soin, un déchet moindre d'environ 1/4 ou 1/5 que celles qui ont été observées à l'époque où la machine a fonctionné en présence de la Commission de l'Institut. Donc plus dans les calculs du paragraphe précédent, on estimera haut le déchet provenant du simple balancement de la colonne liquide, plus nous saurons qu'il faudrait augmenter l'effet utile dans les calculs pour une bonne construction. Il y a, comme on voit, des compensations dans les estimations si elles laissent quelque doute (1).

(1) En 1842, je profitai de ce que le niveau du bassin d'aval, était descendu, par suite des besoins du service, pour observer des oscillations d'une course beaucoup plus grande. Je n'en donnerai pas ici le détail, mon but étant alors d'établir qu'on pouvait très-facilement mettre la colonne liquide en oscillation pour des amplitudes bien plus considérables. Mais, parmi ces expériences, il y en a une assez intéressante pour l'étude de la machine, en ce que le niveau était baissé, dans le bief d'aval, à une profondeur d'environ $0^m,60$, de sorte que l'on se trouvait dans des circonstances qui n'étaient pas trop différentes de ce qui se présentait quant à l'amplitude de la plus grande des deux oscillations, lorsque la machine était en jeu avec le flotteur. On ne doit pas oublier, d'ailleurs, qu'il ne s'agit ici que de comparaisons de résultats analogues, car la descente du niveau de la colonne dans le coude, brisant la surface de ce niveau, change les conditions du phénomène, ainsi que quelques autres circonstances dont j'ai parlé. Il faut surtout tenir compte de ce qu'en *amorçant* l'oscillation par une introduction alternative de liquide, on faisait entrer de l'air dans le coude pour ces grandes amplitudes. Aussi le déchet paraît relativement plus considérable qu'il ne devrait l'être d'après des observations précédentes. Tout cela était, au reste, difficile à prévoir, à cause de ce qu'il

Les différences de déchet que j'avais d'abord cru devoir attribuer exclusivement à des pertes d'eau, qui avaient pu être différentes d'une année à l'autre, dépendaient peut-être de ce que les surfaces frottantes avaient été modifiées par quelques dépôts. En effet, depuis que ces expériences ont été faites, M. Darcy a trouvé, pour des tuyaux neufs, des coefficients des frottements bien moindres que ne l'indiquaient les formules de Prony. M. Dupuit m'a dit à ce sujet qu'au bout de très peu de temps, les surfaces frottantes étant modifiées par des dépôts, cela changeait l'état de la question.

Il y a donc lieu de penser que ce que j'avais attribué d'abord à des différences dans les pertes d'eau pourrait bien dépendre de dépôts de ce genre. De sorte que mes expériences dont il s'agit viendraient à l'appui de cette assertion du savant ingénieur, et auraient même été le fait le plus ancien sur lequel cette opinion aurait pu être appuyée. Quoi qu'il en soit, je crois devoir ne plus considérer les pertes d'eau possibles dans cette circonstance, comme donnant un moyen immédiat d'apprécier le surcroît de rendement qu'aurait pu donner la machine, dans le cas où les joints auraient été exécutés d'une manière plus solide que pour la pose d'un appareil d'essai.

On voit, d'après ces diverses considérations, avec quelle

y a de nouveau et de vraiment singulier dans les phénomènes des résistances passives pour les mouvements variés des liquides.

Il fallait deux ascensions, à partir du moment où le tuyau était plein jusqu'au sommet, pour que la colonne remontante parvînt précisément à l'entrée du bout du tuyau supérieur de $0^m,36$ de diamètre et de $0^m,47$ de haut, la première étant remontée à environ $0^m,27$ du sommet d'abord rempli, d'où elle était descendue. Il fallait ensuite quatre ascensions pour que l'augmentation du déchet, considérée alors dans le tuyau plus large de $0^m,40$ de diamètre, fût de $0^m,54$ environ. Il est facile de voir, comment on peut partir de ces données pour estimer la fraction du déchet de la machine qui serait due aux simples mouvements de la colonne liquide si les choses avaient été dans le même état qu'en 1842, en partant de ce qu'alors la diminution de la première ascension, le bassin d'aval étant plein, était seulement de $0^m,14$ à $0^m,16$ au plus.

réserve on doit employer les moyens de contrôle dont j'ai donné les détails, de sorte que les mesures directes sont toujours les plus concluantes. Mais on voit aussi que, dans le cas où le surcroît de déchet précité, qui se présentait à l'époque de l'expérience officielle, proviendrait de la nature des surfaces frottantes, plutôt que de pertes d'eau occasionnées par la détérioration des joints d'une année à l'autre, il en résulterait qu'une augmentation des diamètres des diverses parties du système aurait sur l'amélioration du rendement une influence plus grande que dans le cas contraire.

Je vais maintenant reproduire le rapport de M. Lamé sur l'expérience du 14 octobre 1843.

Rapport fait à l'Institut, le 7 octobre 1844, sur la machine hydraulique à flotteur oscillant de M. de Caligny. *Commissaires* : MM. Cordier, Poncelet, Lamé, *rapporteur*.

« L'Académie nous a chargés, MM. Cordier, Poncelet et moi, de lui faire un Rapport sur la machine hydraulique à flotteur oscillant inventée par M. de Caligny.

« Cette machine, soumise depuis longtemps au jugement de l'Académie, a déjà été l'objet d'un premier rapport lu, le 13 janvier 1840, par M. Coriolis. Le modèle que l'auteur avait présenté, trop petit pour que l'on pût évaluer son effet utile, suffisait cependant pour confirmer la possibilité de son jeu; mais, afin d'apprécier complétement le nouveau moteur, il restait à l'étudier sur un appareil de grandeur convenable. Vos anciens Commissaires, jugeant que le moteur imaginé par M. de Caligny est basé sur une idée juste et ingénieuse, émettaient le désir que l'inventeur fût mis à même, soit par l'Administration des travaux publics, soit par le secours de l'Académie, d'établir sa machine sur une chute d'eau de la force de 1 à 2 chevaux.

« Excité par ces encouragements, M. de Caligny a fait construire à ses frais un appareil de dimensions suffisantes, qu'il a pu disposer temporairement à l'établissement des bassins de Chaillot, et sur lequel il a entrepris (conjointement avec M. Corot, ancien élève

de l'Ecole centrale des arts et manufactures, employé à la direction des eaux de Paris) une suite d'expériences, décrites dans son nouveau Mémoire. Nous n'avons à rendre compte que des épreuves faites en notre présence, pour apprécier directement le travail produit.

« La machine de M. de Caligny, déjà décrite par M. Coriolis, se compose d'un large tube en forme de L, qui descend du niveau d'un réservoir, et se recourbe ensuite horizontalement au fond d'un bief inférieur. L'eau y tombe par intervalles, et cette chute périodique imprime au niveau du liquide, dans la branche verticale, des oscillations qu'un flotteur d'un grand volume transmet à la machine qui les utilise. L'écoulement de l'eau est alternativement interrompu et rétabli par une vanne cylindrique, liée à un flotteur annulaire qui s'emboîte dans le tube. Quand le niveau oscillant est près d'atteindre la fin de sa course ascendante, l'anneau flotte et la vanne s'ouvre; une portion de l'eau du réservoir pénètre dans le tube et le remplit; cette eau s'écoule ensuite, son niveau baisse, et l'anneau descend avec la vanne, qui se ferme.

« Dans l'appareil établi à Chaillot, et par l'intermédiaire d'une corde et de deux poulies de renvoi, le flotteur oscillant soulevait périodiquement, de 1 m. 62 un mouton à déclic pesant 55 kilogrammes. Connaissant la hauteur de chute, le volume d'eau écoulé et le nombre de coups de mouton obtenus avec cette dépense, il était facile d'en conclure le travail utilisé; toutefois, pour apprécier plus exactement l'effet du moteur, il eût fallu tenir compte des résistances passives du mécanisme additionnel, telles que le frottement des poulies, l'inertie du déclic, etc. En négligeant ces pertes de force, étrangères au moteur hydraulique lui-même, les épreuves faites sous nos yeux ont conduit à un effet utile de 55 pour 100.

« Nous nous empressons de reconnaître que ce résultat, obtenu sur un appareil dont la construction, dirigée avec une stricte économie, laissait beaucoup à désirer, ne doit être considéré que comme un minimum. On ne peut douter, en effet, que la machine hydraulique de M. de Caligny, employée plus avantageusement, construite avec plus de soin, et dans de nouvelles proportions, que les dernières expériences ont indiquées, ne puisse donner un effet utile notablement plus élevé.

« Nous devons dire ici que M. Coriolis attribuait une importance réelle à l'invention de M. de Caligny; car, outre le Rapport favorable qu'il a rédigé, cet illustre savant saisissait toutes les occasions d'en parler avec éloge et d'engager les ingénieurs à utiliser la ma-

chine nouvelle. C'est ce que témoignent plusieurs lettres qui nous ont été communiquées.

« D'après l'épreuve qu'elle a subie, la machine à flotteur oscillant ne paraît pas inférieure à beaucoup de moteurs hydrauliques actuellement en usage, et l'on conçoit certaines circonstances où elle devrait leur être préférée.

« En définitive, vos Commissaires ont l'honneur de vous proposer de reconnaître que la machine ingénieuse présentée par M. de Caligny peut être employée avec avantage, et de remercier l'inventeur pour les communications qu'il a faites à l'Académie.

« Les conclusions de ce Rapport ont été adoptées ».

Afin d'éviter tout malentendu, je dois dire que, pour le modèle décrit dans le rapport de M. Coriolis sur ce système, le flotteur annulaire était distinct de la soupape, appelée vanne cylindrique dans le rapport de M. Lamé. Mais, dans les expériences mentionnées par ce dernier, la soupape annulaire était telle qu'elle a été décrite ci-dessus.

Voici une des lettres de M. Coriolis, citées dans le Rapport de M. Lamé sur ma principale expérience. Elle avait été écrite, le 25 juillet 1839, à M. Poirée, inspecteur général des Ponts et Chaussées, qui a bien voulu me la communiquer. Je l'ai publiée parce que c'est une pièce officielle adressée à l'un des membres de la Commission de Versailles par le rédacteur du premier Rapport favorable fait à l'Institut sur cette machine, le 13 janvier 1840. On y verra dans quels termes M. Coriolis s'exprimait quand il parlait de mes travaux en son propre nom.

« Monsieur,

« M. de Caligny m'apprend que vous désirez avoir mon opinion « sur une machine de son invention ayant pour objet d'utiliser une « chute d'eau par les oscillations dans un siphon. Il m'a dit que « vous pourriez faire l'essai de cette machine à Marly, si vous pen- « siez qu'une telle expérience offrît quelques chances de succès. Je « répondrai au désir de M. de Caligny en vous disant que j'ai « examiné son projet, et que j'ai reconnu qu'il était bien conçu,

« suivant les règles de la dynamique et *avec une adresse d'invention*
« *dont son auteur a déjà fait preuve dans une autre machine analogue.*
« Je crois que l'essai de la nouvelle machine de M. de Caligny sera
« une chose utile à la science et à l'industrie, et que l'administra-
« tion ferait bien, n'importe sur quels fonds, de se charger des
« frais de cette expérience. Cette machine, si elle est bien construite,
« peut donner un très bon produit, et son auteur ne pouvant faire
« lui-même l'expérience, *il est plus que convenable* que l'administra-
« tion l'aide autant qu'elle le pourra.

« G. Coriolis. »

Influence de la largeur d'une branche verticale du tuyau de conduite sur le rendement, pour deux formes de l'appareil.

Quand on élargit la branche verticale dans laquelle fonctionne le flotteur, en conservant le même rapport entre la section de ce dernier et celle de cette branche, il est facile de voir, d'après les principes exposés dans la première partie, que cela doit diminuer le rendement à cause du chemin parcouru par les résistances passives. Il faut de plus tenir compte des pertes de force vive, résultant des variations de sections. Mais quant à l'introduction de l'eau par une soupape annulaire disposée au sommet de l'appareil, si l'on faisait abstraction des considérations dont je viens de parler, on serait conduit à un résultat intéressant.

Si, par exemple, la section de la branche verticale est quadruple de celle du reste du tuyau de conduite, il faudra emmagasiner une force vive quadruple, le tuyau de conduite étant par hypothèse d'une longueur assez notable relativement à la branche verticale, il suffira que la vitesse y soit à peu près double de ce qu'elle était quand la section des deux parties, l'une horizontale, l'autre verticale, était la même. Or, pour une section quadruple de la partie verticale, la circonférence de cette dernière sera double. Si donc

le siège de la soupape annulaire est à la même profondeur au-dessous du niveau d'amont, il suffira que les vitesses soient les mêmes à la fin de chaque période pour que la quantité d'eau fournie par seconde soit alors double.

La force qui tend à faire descendre les poutrelles dans les barrages se trouvera donc sensiblement la même pour chaque unité de la longueur développée du pourtour de la soupape. Il reste à voir comment se comportera la force pouvant dépendre de ce que, à un instant donné, la colonne liquide tendra à débiter plus d'eau qu'il ne peut en venir par la soupape. Sous ce rapport, les choses resteront aussi dans un état semblable, puisque, si la section de l'orifice d'introduction est double, le seuil étant à une même profondeur, au-dessous du niveau d'amont, la vitesse dans le tuyau de conduite sera double. On voit d'après cela comment les choses sont modifiées, soit quand on élargit, soit quand on réduit la section du tuyau vertical en tenant compte des considérations précitées.

L'élargissement du tuyau vertical descendant du bief d'amont permettra de modifier la distance de l'orifice d'introduction de l'eau motrice aux parois du flotteur. Or on sait que la distance d'une paroi recevant la percussion d'une veine liquide a sur la perte de force vive une influence dont l'intensité n'est pas encore bien connue.

Quand la chute motrice est grande par rapport à la course qu'on désire donner au flotteur, il n'est pas nécessaire de disposer celui-ci dans le tuyau qui descend immédiatement du bief supérieur, où cette course pourrait d'ailleurs être réglée de manière à utiliser à chaque période une quantité donnée de travail. On peut modifier l'appareil de la manière suivante. L'eau du bief d'amont pourrait entrer comme dans le système précédent. Mais le flotteur, au lieu de fonctionner

dans la branche du tuyau qui descend de ce bief, serait disposé dans la seconde branche convenablement élargie d'un siphon renversé. L'extrémité supérieure de celle-ci dépasserait un peu le niveau du bief d'aval, seulement de la quantité nécessaire pour que l'eau qui serait versée dans ce dernier ne pût rentrer dans le système.

La course d'un large flotteur pourrait ainsi être assez petite, étant déterminée par les oscillations du niveau dans la grosse branche. La colonne liquide aurait alternativement un mouvement rétrograde, en s'allongeant dans la branche la moins large, pour aller à la rencontre de la force motrice, et soulever la soupape d'amont, comme je l'ai expliqué pour le système, objet principal de ce chapitre. Cette forme de l'appareil a beaucoup d'analogie avec celle d'une des pompes à flotteur décrites ci-dessus, et dont la disposition est en quelque sorte l'inverse de celle-ci. Voir page 666.

J'ai donné dans la première partie les formules relatives aux oscillations dans les siphons renversés à branches de sections inégales. Il est facile d'en conclure qu'il y aurait, en général, plus de travail en résistances passives dans ce système que dans celui où l'oscillation du flotteur se fait, comme ci-dessus, dans la branche qui descend du bief d'amont. Le niveau moyen autour duquel se ferait l'oscillation étant plus bas que celui du bief inférieur, les courses de la colonne liquide seraient plus grandes. Il faut aussi tenir compte de ce que l'eau motrice serait obligée de se verser un peu au-dessus du niveau du bief d'aval. Il est intéressant de conserver la trace de cette forme de l'appareil qui peut d'ailleurs avoir aussi ses avantages.

Dans l'un et l'autre système, si l'on tient avant tout au rendement, il est intéressant que la branche qui descend du bief supérieur puisse avoir un diamètre moindre que celui du reste de la conduite. Il y a, bien entendu, des limites au delà desquelles l'avantage de diminuer le chemin des résistances passives dans le tuyau de conduite serait plus que compensé

par l'augmentation de frottement qui en résulterait. Il faut d'ailleurs tenir compte des pertes de force vive résultant des changements de diamètre. On peut il est vrai atténuer ces dernières, en ne faisant varier les sections que par degrés insensibles, d'après les principes exposés ci-dessus.

Transformation de l'appareil en machine pour les épuisements.

Si l'on conserve le mode d'introduction de l'eau tel qu'il a été essayé, il suffit, comme je l'ai dit pour d'autres appareils à colonne liquide oscillante, d'ajouter à une profondeur convenable une soupape, disposée de manière à laisser entrer l'eau à épuiser sans lui permettre de repasser par le même orifice. Sans qu'il soit nécessaire d'entrer dans plus de détails on voit que, pour une machine de très grandes dimensions, cette soupape peut être annulaire, étant alternativement relevée par un flotteur au commencement de l'oscillation remontante. Dans la pratique il sera d'ailleurs peut-être plus commode d'y substituer une couronne de clapets.

Si la profondeur à laquelle on veut faire des épuisements est trop petite par rapport à la hauteur de la chute motrice, cette forme du système n'est point applicable puisqu'il faut qu'à chaque période, l'oscillation remontante s'élève assez haut pour soulever la soupape annulaire du bief d'amont. Il y a évidemment des limites d'élargissement au-dessous du niveau d'aval qu'on ne doit point dépasser. Dans ces conditions il vaudrait mieux employer la disposition précitée pour laquelle les oscillations du flotteur auraient beaucoup moins d'amplitude, se faisant dans une seconde branche très élargie d'un siphon renversé. On conçoit que si, au lieu d'y mettre un flotteur, on y fait osciller une colonne liquide, le niveau de celle-ci pourra descendre aussi peu qu'on le voudra dans

le cas où les épuisements ne devront se faire qu'à une très petite profondeur.

Si, au contraire, la profondeur à laquelle on veut faire des épuisements est beaucoup plus grande que la hauteur de chute motrice, il est utile de rétrécir convenablement la section du tuyau descendant, au-dessous du niveau du bief inférieur, sans cette précaution l'oscillation remontante ferait rentrer au bief supérieur une quantité d'eau qui, traversant deux fois le système, augmenterait sans nécessité le travail en résistances passives. Il y a, pour chaque diamètre du tuyau de conduite, des limites de rétrécissement qu'on ne pourrait dépasser sans augmenter le travail en résistances passives.

Considérations théoriques, influence des quantités d'eau motrice sur le rendement de cet appareil pour les épuisements.

Afin de donner une idée du calcul des quantités d'eau motrice qui conduisent au maximum de rendement, je choisirai, d'abord, le cas de cet appareil pour les épuisements, où, le tuyau vertical ayant à peu près le même diamètre que le tuyau de conduite, les choses sont disposées de manière que l'oscillation remontante arrive à la hauteur voulue pour soulever la soupape d'amont. Il sera facile de voir comment on pourra généraliser les conséquences de la théorie. Il est clair qu'abstraction faite de tout rendement il faut d'abord que l'oscillation soit entretenue. Or, cela ne peut se faire sans qu'on ait à surmonter une quantité donnée de travail en résistances passives. Ainsi voilà une *constante* dont le rapport à la quantité d'eau motrice sera en raison inverse de celle-ci pour chaque période.

On admettra qu'à l'époque où l'eau motrice entre dans le système la force qui serait nécessaire pour conserver les

vitesses, comme s'il n'y avait pas de cause de déchet, augmenterait sensiblement pendant chaque période, proportionnellement à la quantité d'eau descendue avant l'instant considéré, la soupape d'amont étant ouverte. Lorsque celle-ci est fermée, il faut ajouter à la quantité de force vive déjà acquise celle qui résulterait de l'oscillation descendante, dont j'ai parlé plus haut, comme pouvant exister abstraction faite de cette introduction de l'eau motrice.

Quand la surface de la colonne liquide sera descendue à la profondeur, qui aurait été atteinte par cette oscillation descendante, si l'on n'avait pas introduit d'eau motrice, il ne restera plus à cette colonne d'autre force vive que celle qui a été engendrée par l'eau motrice venant du bief supérieur. A partir de cet instant les carrés des vitesses diminueront comme les ordonnées d'un triangle, la soupape inférieure étant ouverte; ils avaient augmenté comme les ordonnées d'un triangle pendant que l'eau venait d'amont.

Il est bien entendu que, dans toutes ces études sur les conditions du maximum de rendement, on considère provisoirement les vitesses dans l'état où elles seraient si, par un moyen quelconque, les résistances passives étaient surmontées de manière à conserver les vitesses aux carrés desquelles ces résistances sont supposées proportionnelles, comme s'il n'y avait pas de causes de déchet. On fait provisoirement abstraction des difficultés résultant de l'instant, d'ailleurs très court, pendant lequel la soupape annulaire d'amont se baisse en étranglant la veine liquide. Il sera ensuite facile de se rendre compte des chances d'erreur qu'on pourra commettre, en employant ces moyens de considérer des limites du travail en résistances passives dans des tuyaux de grands diamètres, pour des oscillations dont les amplitudes ne seront pas relativement trop considérables.

Cette forme de l'appareil est celle qui permet de déterminer le plus approximativement les conditions du maximum d'effet utile. Le rapport du travail en résistances passives, pendant

que la soupape d'amont est ouverte et pendant que celle d'épuisement est ouverte à son tour, à la quantité d'eau motrice descendue à chaque période peut être, d'après ces hypothèses, considéré comme proportionnel à cette quantité. Quant au surcroît de résistances passives, résultant pendant l'oscillation descendante de la force vive déjà acquise lorsqu'on ferme la soupape d'amont, elle est proportionnelle à cette quantité d'eau motrice. Ainsi elle ne peut pas servir à déterminer le volume de cette eau qui conduit au maximum de rendement.

Il reste donc à considérer deux quantités de travail en résistances passives, le rapport de l'une d'elles au volume d'eau motrice étant en raison de ce dernier, et le rapport de l'autre au même volume étant en raison inverse. Or nous avons vu plus haut à quel résultat on est conduit dans ces conditions, d'ailleurs je vais revenir sur ce sujet dans le paragraphe suivant. Il est bien entendu que nous avons supposé les résistances passives sensiblement proportionnelles aux carrés des vitesses.

Influence des quantités d'eau motrice sur le rendement de la machine à flotteur oscillant.

Un inconvénient de cette machine étant d'exiger des dimensions considérables pour obtenir un bon effet utile, je vais donner une idée des limites conduisant dans chaque circonstance au maximum de rendement. Je vais spécialement examiner le cas où le flotteur est dans la branche qui descend d'amont. Les résistances passives ne sont pas toutes assez connues pour qu'on puisse établir des calculs rigoureux, même relativement au cas plus simple qui vient d'être examiné. Il est donc bien entendu qu'il s'agit seulement de rassurer sur la grandeur des dimensions de l'appareil, en indiquant d'ailleurs des moyens de se rendre compte de ses

effets approximativement. Je vais m'occuper spécialement de la forme pour laquelle le flotteur est dans la branche qui descend du bief d'amont.

Il y a deux manières de considérer l'introduction de l'eau motrice. Celle que j'ai décrite plus haut paraît être la meilleure en général. Mais il est intéressant d'étudier aussi le cas où l'eau serait introduite au-dessous du flotteur, supposé occupant autant que possible toute la largeur du tuyau au sommet de celui-ci, on admettra pour un calcul de limites qu'il occupe même toute la section.

Dans cette hypothèse on peut disposer les éléments du calcul d'une manière très simple pour le cas où l'on admettrait provisoirement, aussi dans un calcul de limites, que l'air pourrait passer librement d'une extrémité à l'autre du flotteur. Les résistances industrielles à vaincre seraient supposées capables de réduire le flotteur au repos à l'instant où la colonne liquide descendante serait atteinte ayant perdu sa vitesse.

Ces résistances n'agiraient plus par hypothèse à partir du moment où la colonne liquide devrait relever le flotteur supposé d'une densité peu différente de celle de l'eau. Il résulte de ces considérations que si le flotteur est regardé comme liquifié, son sommet devant être relevé au niveau du bief d'amont, l'oscillation remontante pourra être considérée comme ayant une amplitude à peu près indépendante de la longueur du flotteur. La partie du travail en résistances passives provenant de cette oscillation en retour pourra donc être regardée comme étant la même pour des longueurs de flotteur très différentes. Quant à la surface de la colonne liquide lorsqu'elle est en mouvement de haut en bas, elle devra descendre au-dessous du niveau d'aval à une profondeur égale à la somme de la hauteur de chute et de la longueur du flotteur, plus l'excès de profondeur nécessaire pour faire atteindre le niveau donnant malgré la résistance passive, à la fin de l'oscillation remontante.

L'eau coulant vers le bief inférieur se compose de deux parties. L'une provient du bief supérieur, l'autre du refoulement vers le bief d'aval en vertu de la vitesse acquise par la descente de cette eau motrice. Dans les limites dont on a besoin pour ce genre d'approximation, on peut admettre que la quantité d'eau motrice est proportionnelle à peu près au poids du flotteur qui serait destiné, par hypothèse, quelles que fussent ses dimensions, à parcourir une hauteur double de celle de la chute motrice ; et que les carrés des vitesses augmentent, pendant chaque période, comme la quantité d'eau descendue avant chaque instant considéré. Il en résulte, ainsi que pour les calculs sur le piston aspiré et pour l'appareil d'épuisement dont je viens de parler, un travail en résistances passives dont le rapport à la quantité d'eau motrice est en raison de celle-ci.

Nous avons vu que le travail en résistances passives pour l'oscillation en retour étant assez sensiblement une *constante*, indépendante de la quantité d'eau motrice, son rapport à cette dernière est en raison inverse de celle-ci. Cependant on ne peut pas appliquer sans modification la règle indiquée pour des circonstances semblables, pages 689 et suivantes, pages 693 et suivantes, à cause de la manière dont se présentent les résistances passives dans l'oscillation descendante, quand la communication est interrompue avec le bief d'amont. Je suppose que les carrés des vitesses diminuassent à partir de cet instant comme les ordonnées d'un triangle, le chemin parcouru par le flotteur et par la surface de la colonne liquide serait toujours supposé le même pour des flotteurs de longueurs très différentes. Il est facile de voir que le travail qui serait nécessaire pour conserver les vitesses de l'eau comme s'il n'y avait pas de cause de déchet, serait proportionnel à la quantité d'eau descendue dans chaque période, puisque le carré de la vitesse engendrée serait supposé proportionnel à cette même quantité.

Cette partie du déchet ne pourrait donc pas servir à dé-

terminer le volume d'eau qui conduit au maximum de rendement.

Mais il n'en est pas ainsi, en effet, même abstraction faite de ce que les vitesses frottantes sont diminuées par les résistances passives, les carrés des vitesses varieraient à peu près comme les cercles parallèles d'un segment d'ellipsoïde de révolution s'il n'y avait pas de causes de déchet. Ainsi ce serait seulement pour un flotteur, d'une longueur très grande par rapport à la chute motrice, que les carrés des vitesses pourraient être supposés diminuer à peu près comme les ordonnées d'un triangle, d'après les mesures connues des volumes de ces segments, quand leurs hauteurs sont assez petites par rapport à celle de cet ellipsoïde.

Si cette longueur n'est pas assez grande pour remplir ces conditions le travail en résistances passives ne diminuera pas dans cette partie de l'opération, proportionnellement à la quantité descendue dans chaque période, comme on le voit au moyen du renflement de la courbe représentant les carrés des vitesses. Il y a donc lieu de conclure qu'on n'estimera pas assez haut la quantité d'eau conduisant au maximum de rendement, si on la calcule au moyen de la règle précitée; c'est-à-dire en disposant les choses de manière que le travail en résistances passives, pendant que la communication est établie avec le bief d'amont, soit égal au travail en résistances passives pendant l'oscillation remontante avec les restrictions déjà discutées pour les machines à piston aspiré (1).

(1) Depuis que ce qui précède est imprimé, M. Félix de Lalande m'a communiqué une note sur des expériences précitées, que nous avons faites ensemble en 1870. Il s'agissait, au moyen de mon système de piston oscillant sans soupape, d'obtenir des périodes très rapides. Une caisse en bois recevait l'eau motrice. Le fond était traversé par un tube de $0^m,03$ à $0^m,04$ de diamètre ayant des *fenêtres* un peu au-dessus de ce fond, et dont l'extrémité inférieure plongeait dans une autre caisse servant de bief d'aval. Dans ce tube se trouvait un piston conique, portant une garniture de caoutchouc que la pression de l'eau appliquait contre les parois. Ce piston était suspendu à un ressort de

Il est bien à remarquer que cette méthode d'approximation tient compte de la perte de force vive, supposée comme les autres proportionnelle aux carrés des vitesses, qui résulte du mode d'introduction de l'eau motrice dans l'appareil. Pour pouvoir faire des calculs numériques bien rigoureux sur cette dernière cause du déchet, il faudrait, il est vrai, quelques expériences spéciales. Mais il était d'abord essentiel de montrer comment elles pourraient être interprétées dans le cas dont il s'agit, en supposant certains coefficients connus.

Dans l'appareil tel qu'il a été exécuté, l'eau entre au sommet par un orifice annulaire d'une section à peu près égale à la moitié de celle du tuyau. Une des parois est formée par le flotteur arrivé au haut de sa course, et de ce côté il n'y a pas de contraction de veine liquide. On peut d'ailleurs diminuer la contraction sur l'autre pourtour de l'orifice. Lorsque la communication est interrompue avec le bief d'amont, la colonne liquide annulaire descend autour du flotteur, et tendrait à faire une oscillation de haut en bas quand même il ne serait pas venu d'eau du bief supérieur.

Il faut d'abord considérer séparément cette oscillation qui, dans le cas où le flotteur dépasserait une certaine limite de longueur au-dessous du niveau du bief d'aval, occasionnerait un travail en résistances passives indépendant de la quantité d'eau motrice descendue à chaque période et supposée pro-

caoutchouc attaché à une traverse qu'on pouvait tendre à volonté en limitant sa course. La différence de niveau de l'eau des deux vases était, autant qu'il peut s'en souvenir, comprise entre 1 mètre et $1^m,30$. La hauteur de l'eau dans la caisse supérieure au-dessus des *fenêtres* de ce tube vertical était de $0^m,20$ à $0^m,30$. Le tube de sortie avait une longueur d'environ $0^m,80$ à $1^m,10$, plus celle de la partie plongée. Suivant les conditions, nous avons obtenu une amplitude et un nombre de périodes que nous avons pu rendre très variable allant, comme je l'ai dit, même à un peu plus de quatre par seconde.

portionnelle au poids du flotteur. Mais il n'en est point ainsi quand ce dernier n'est pas assez long pour rester en place jusqu'à la fin de cette oscillation descendante, considérée, abstraction faite de l'introduction de l'eau d'amont. Il est clair que, si le flotteur est abandonné par le liquide au-dessous du niveau d'aval, le chemin parcouru dans le tuyau de conduite sera plus long que dans le cas contraire. De sorte que le travail en résistances passives, provenant de cette oscillation descendante, sera d'autant moindre que le flotteur sera plus long.

Nous supposerons provisoirement que la course de ce dernier soit indépendante de sa longueur, et soit toujours au moins égale à la hauteur de la chute motrice. Dans cette hypothèse, si le flotteur descendu au bas de sa course était tenu en repos, il faudrait toujours que la colonne liquide pût remonter jusqu'au niveau du bief d'amont. Il semble au premier aperçu que d'après cela le travail en résistances passives pour l'oscillation remontante serait indépendant de la longueur du flotteur, à laquelle on suppose à peu près proportionnelle la quantité d'eau motrice descendue à chaque période. Mais il n'en est pas ainsi, parce que plus le flotteur est long, moins le chemin parcouru par les résistances passives est grand dans le tuyau de conduite. Ce qui simplifie l'état de la question, c'est que les choses se passent à peu près, quant à l'ascension de l'eau dans les limites indiquées plus haut, comme si le flotteur était ainsi immobile. Dans le cas où les deux oscillations dont je viens de parler donneraient lieu chacune à un travail en résistances passives qui serait une constante, il est facile de voir comment on pourrait appliquer les considérations présentées pour l'hypothèse où le flotteur serait presque aussi gros que le tuyau.

Mais la quantité d'eau qui serait calculée par ce moyen, comme conduisant au maximum de rendement, serait évidemment trop faible, si les deux quantités de travail en résistances passives dont je viens de parler ne sont pas aussi

grandes qu'on l'aurait supposé pour des longueurs de flotteur plus considérables.

Ce qui vient d'être dit suppose que la longueur du flotteur conduisant au maximum de rendement est assez notable. On le sait, en effet, d'avance d'après ce qui a été expliqué pour l'autre hypothèse. Les différences de travail en résistances passives provenant du frottement de l'eau, ne sont pas évidemment assez grandes pour changer d'une manière trop notable quant à l'emploi de ces considérations, le travail qui, à chaque période, doit être recueilli par le flotteur afin de conduire à un rendement maximum.

Il ne s'agit au reste, dans l'état actuel de nos connaissances sur les résistances passives pour les mouvements oscillatoires de ce genre, que de fixer les idées sur la marche générale des résultats. Les calculs sont d'ailleurs encore simplifiés pour le cas où, le tuyau de conduite ayant une longueur suffisante, les vitesses d'introduction sont assez petites. Dans cette hypothèse il est facile de voir pour toute cette classe de machines, qu'avec un tuyau d'un diamètre suffisant on pourrait réduire presque indéfiniment les causes de déchet si l'on ne craignait pas de faire une dépense trop considérable en frais de premier établissement.

Il est d'ailleurs évident qu'il ne serait pas convenable, dans tous les cas, de réduire la longueur du tuyau de conduite de manière à ne point satisfaire aux conditions du maximum d'effet, calculé dans chaque circonstance, d'après la perte de force vive résultant du mode d'introduction de l'eau motrice, en supposant que cette dernière perte soit indiquée d'avance par les vitesses qu'on est obligé de donner pour cette introduction. Voir p. 693, 697 quant à un détail de calcul. Je reviendrai d'ailleurs, dans le chapitre suivant, sur les considérations indiquées à ces pages.

CONCLUSIONS.

L'appareil, objet de ce chapitre, a été présenté à la Société Philomathique le 26 janvier 1839. J'avais déjà parlé l'année précédente de son principe qui peut être appliqué de plusieurs manières. Un flotteur est un moyen simple d'utiliser diverses machines à colonne liquide oscillante de mon invention, quand on veut les employer comme moteur au lieu de s'en servir pour élever de l'eau.

L'idée d'employer un flotteur pour utiliser une chute d'eau n'est pas nouvelle. Mais on ne savait pas l'appliquer sans perdre la force vive de l'eau qui a soulevé le flotteur et qui, dans la machine de Bossu et Solages, descendait au bief d'aval en tombant inutilement d'une hauteur notable, ainsi que cela est rappelé dans le premier rapport fait à l'Institut sur cet appareil de mon invention.

Je reviendrai plus loin sur ces systèmes. Mais dans ce chapitre je tiens à appeler spécialement l'attention sur le mode d'introduction de l'eau motrice, tel que je l'ai présenté dans les expériences précitées, et tel qu'il peut aussi être employé pour un appareil à faire des épuisements. Il en résulte, en effet, qu'avec un tuyau de conduite d'une longueur et d'un diamètre suffisants on peut dans bien des cas réduire le déchet à quelques centièmes du travail moteur. L'inconvénient de cette forme de l'appareil à flotteur oscillant consiste dans la profondeur des fondations et dans les dimensions de ses diverses parties. Mais la propriété dont je viens de parler me paraît assez essentielle pour être spécialement signalée.

On verra mieux plus loin dans quelles conditions il est utile de substituer ainsi le frottement d'une colonne liquide à celui d'un piston. sans autres pertes de force vive bien notables que celle qui est indispensable dans un siphon renversé, où l'eau oscille librement sans aucun coup de bélier possible. Pour

des chutes motrices assez variables, on pourrait, en employant des vannes cylindriques, changer convenablement les conditions. Mais j'insiste peu sur ce détail ayant, comme on le verra plus loin, d'autres moyens d'obvier à ce genre de difficultés.

Quant au mode d'introduction de l'eau, on peut diminuer encore la perte de force vive qui en résulte, en élargissant le sommet de l'appareil et la soupape annulaire, dans les limites où cela ne conduira pas à des dimensions trop gênantes,

Si l'on élargissait la soupape annulaire sans évaser le sommet de l'appareil, la veine liquide serait obligée de se resserrer pour passer en définitive par l'orifice d'introduction. Il y aurait même du désavantage à certains égards. On voit d'après cela que, s'il est intéressant de conserver la trace de cette modification, il ne faut pas en exagérer l'importance pratique.

Le rapport précité de M. Combes, fait sur cet appareil avant qu'il eût été exécuté, renferme le passage suivant, relatif à toute cette classe de machines et aux moteurs hydrauliques à piston aspiré que j'ai inventés depuis.

« ..... C'est une condition essentielle du bon établissement des « appareils de ce genre, que les parties qui ont un mouvement al- « ternatif diminuent de vitesse, par degrés insensibles, à la fin de « chaque période de mouvement, pour prendre ensuite une vitesse « en sens contraire. Si cette condition n'est point remplie, la ma- « chine est bientôt détruite par les chocs qui se produisent pério- « diquement, à des intervalles rapprochés. Ainsi dans les machines « à vapeur à simple effet, l'on obtient une vitesse du piston gra- « duellement décroissante jusqu'à 0, dans la course descendante, « en réglant convenablement la partie de la course, pendant la- « quelle la vapeur de la chaudière est admise dans le cylindre; l'on « détruit graduellement la vitesse, dans la course ascendante, en « fermant la soupape d'équilibre, avant que cette course soit en- « tièrement accomplie, de sorte que la pression de la vapeur crois- « sant, à mesure que son volume diminue, ralentit insensiblement

« et éteint la vitesse. Dans les machines à colonne d'eau, ces moyens « ne sont plus applicables, à cause de la faible compressibilité de « l'eau. On y supplée, d'une part, en diminuant beaucoup la vitesse « moyenne des pistons, et, d'autre part, par l'ouverture et la ferme- « ture très lente des passages par lesquels les eaux motrices entrent « dans le cylindre et en sortent. Il est évident que l'on n'obtient ici « ce résultat qu'aux dépens de la force motrice. Car le rétrécisse- « ment des ouvertures, que le liquide doit traverser, donne lieu à « des résistances passives, que l'on peut comparer à celle d'un « frein, que l'on appliquerait extérieurement à une machine, « dont on voudrait ralentir la vitesse. Dans le bélier hydraulique « les variations de vitesses ont lieu dans un temps très court, sur- « tout lorsqu'on supprime le réservoir d'air, et c'est sans contredit « à cette cause qu'il faut attribuer la prompte détérioration de ce « genre de machine, et la diminution d'effet utile observée, à me- « sure qu'on élève l'eau à une hauteur plus grande, par rapport à « la chute d'eau. La machine à flotteur oscillant de M. de Caligny, « n'est pas sujette aux inconvénients de cette espèce. La vitesse du « flotteur aux extrémités de la course s'étendra, en effet, par degrés « insensibles, sans aucun choc ni perte de forces, comme la vitesse « de la colonne d'eau oscillante, et de plus il est tout à fait impos- « sible qu'il survienne à cette époque un choc entre corps solides, « comme cela arrive souvent, par la maladresse des machinistes « dans les machines à vapeur à simple effet et les machines à co- « lonne d'eau..... »

C'est surtout au point de vue de la théorie, et pour en faciliter l'exposition, que j'ai considéré, p. 774 à 777 (p. 774, ligne 34, au lieu de donnant, lisez d'amont) l'hypothèse pour laquelle le flotteur occuperait autant que possible toute la largeur du tuyau. Il y a évidemment une limite au-delà de laquelle il y aurait un coup de bélier d'autant plus nuisible que le flotteur lui apposerait plus de résistance. En résumé, on pourra, quant à sa section et au mode d'introduction de l'eau qui en résulte, adopter les proportions sanctionnées par l'expérience, au moins jusqu'à ce que de nouvelles observations aient permis de déterminer quel est l'espace annulaire qu'on peut se contenter de laisser libre autour de lui. Quoi qu'il en soit, lorsque le coude ne sera pas très arrondi, il sera convenable que l'axe du flotteur, au lieu de se confondre avec celui du tuyau vertical, soit plus ou moins dans la partie d'amont de celui-ci.

EXPÉRIENCES ET CONSIDÉRATIONS DIVERSES

SUR UN NOUVEL

APPAREIL HYDRAULIQUE AUTOMATIQUE

A TUBE OSCILLANT.

Description de l'appareil.

Dans un mémoire que j'ai publié sur cette machine en 1862 (*Journal de Mathématique* de M. Liouville, 2e série, t. 7), j'ai rappelé que le 3 novembre 1850 je l'avais fait fonctionner à Saint-Germain-en-Laye, en présence de MM. Cagniard de Latour, Clapeyron et de plusieurs autres personnes compétentes qui demeuraient alors dans cette ville. J'en avais déjà indiqué le principe dans le mémoire présenté à l'Institut en 1837, qui a été l'objet des deux rapports dont j'ai donné plus haut des extraits. Le tube oscillant y était signalé. C'était un moyen de ne jamais boucher les sections transversales de manière à éviter les coups de bélier. J'avais publié depuis une note sur ce sujet intitulée *Colonne oscillante à soupape cylindrique de grandes dimensions* dans le bulletin de la Société Philomathique, séance du 19 février année 1842. Voir le journal *l'Institut*. Mais ce fut seulement au mois de novembre 1850 que je trouvai le moyen de faire fonctionner cet appareil entièrement abandonné à lui-même en employant un principe nouveau de *succion* qui ne fut pas d'abord géné-

ralement admis par les ingénieurs. Voir pour les phénomènes dont il s'agit la première partie de cet ouvrage pages 318 à 330 et pages 356 à 368. J'ai fait diverses communications sur ces phénomènes à la Société Philomathique depuis le 2 décembre 1850. Voir le journal *l'Institut*.

Je vais reproduire le rapport fait par M. Combes en 1852 à la Société centrale d'Agriculture de France au nom de la *section de mécanique agricole et irrigations* sur le premier modèle dont il s'agit, qui avait été transporté dans un jardin maraîcher de Versailles. Il y a fonctionné pendant plusieurs années jusqu'à l'époque où le tuyau en zinc très mince n° 13 se trouva trop endommagé parce que les eaux qui alimentaient le bief supérieur étaient un peu corrosives. Comme on n'en avait pas besoin dans cette localité, je ne le fis pas reconstruire, d'autant plus qu'il avait été visité par un grand nombre de personnes qui s'étaient inscrites sur un registre et avaient constaté sa marche de jour et nuit. M. Rumeau, inspecteur général des ponts et chaussées, et M. Vauchelle, maire de Versailles, certifièrent d'ailleurs l'utilité de cet essai et la facilité de la mise en train. Il ne s'agissait au reste que d'une première étude bien perfectionnée depuis cette époque. Et si je reproduis d'abord le rapport de M. Combes c'est surtout à cause de la clarté avec laquelle il en donne la description. On y verra d'ailleurs avec quelle réserve il parle d'un principe de succion que j'avais signalé dans cet appareil, et cette réserve même vient à l'appui de la nouveauté de ce principe.

Quant au rendement, il y a deux conditions essentielles à considérer. Dans bien des cas c'est surtout l'extrême simplicité de l'appareil dont on aura à se préoccuper. Mais lorsqu'on aura très peu d'eau à sa disposition, il sera utile de savoir qu'on pourra, avec un même appareil, avoir dans certaines limites de débit, un rendement beaucoup plus grand que pour des quantités d'eau plus considérables. Ainsi, d'après les expériences dont on donnera plus loin le détail, on peut faire,

selon les conditions dont il s'agit, varier le rendement de 0,40 à 0,70 environ (1).

Rapport de M. Combes sur les premières expériences de Versailles.

« M. de Caligny a adressé à la Société, le 20 janvier et le 2 mars de cette année, les descriptions de deux machines à élever l'eau, tout à fait différentes des pompes et autres appareils connus destinés au même usage, et qui ne sont pas moins remarquables par la simplicité de leur construction que par la nouveauté des formes et du mode de fonctionnement. Nous ne vous entretiendrons aujourd'hui que de celle qui fait l'objet de la lettre du 20 janvier, parce que c'est la seule que nous ayons pu encore étudier, et qu'elle est, d'ailleurs, la plus importante des deux. Cette machine a pour moteur une chute d'eau; elle se compose, comme le bélier hydraulique de Montgolfier, d'un tuyau fixe qui prend l'eau d'une source ou bassin supérieur, et d'un tuyau ascensionnel qui reçoit une partie de l'eau amenée par le tuyau fixe, laquelle vient se déverser au sommet de ce tuyau, tandis que l'autre partie s'est écoulée dans un canal de décharge. Ici finit l'analogie avec le bélier. Dans la machine de M. de Caligny, il n'existe ni soupape d'*arrêt* ni soupape d'*ascension*; partant, point d'arrêt brusque ni de choc de la colonne d'eau en mouvement contre les parois du tuyau. Lorsque l'eau ne doit être élevée qu'à une hauteur médiocre au-dessus du canal de décharge, le tuyau vertical ascensionnel est mobile. Il est suspendu, par sa partie supérieure, à l'un des bras d'un balancier dont l'autre bras est chargé d'un poids plus grand que le sien, et qui tend, par

(1) Il y a lieu d'espérer qu'on pourra augmenter encore le rendement en employant le frein hydraulique appliqué avec succès à l'écluse de l'Aubois, pour empêcher le tube mobile de rebondir. D'ailleurs la force vive de ce tube qu'il s'agit d'amortir d'une manière convenable, pourra sans doute être employée, pour les machines de grandes dimensions, à faire fonctionner au besoin une pompe dont le produit sera ajouté à l'eau élevée directement au sommet de l'appareil. On conçoit que cette pompe pourrait être disposée de manière à ne faire éprouver une résistance notable que pour la partie de la course descendante du tube mobile où il est essentiel de diminuer la vitesse de cette course, afin que la percussion sur le siège soit insignifiante, la résistance étant d'ailleurs disposée de manière à ne pas s'opposer à l'adhérence du tube sur le siège quand il est y descendu.

conséquent, à le tenir soulevé jusqu'à une hauteur limitée par un arrêt fixe. Lorsqu'il occupe cette position, il existe, entre son extrémité inférieure et l'orifice du tuyau fixe, dont le bout se relève verticalement au-dessous du premier, un intervalle par lequel l'eau, venant du bassin supérieur, s'écoule dans le canal de décharge. A un certain moment, par suite d'une force qui se développe sous l'influence du mouvement de l'eau, et que M. de Caligny compare à une succion, le tuyau mobile descend, en soulevant le contre-poids, et vient s'appliquer, par un anneau dont il est garni à sa base, sur un siège formant rebord horizontal autour de l'orifice du tuyau fixe. Dans cette situation, il n'y a plus de solution de continuité entre les deux tuyaux; la colonne d'eau en mouvement dans le tuyau fixe monte, en vertu de la force vive dont elle est animée, dans le tuyau ascensionnel, qu'elle remplit complètement, et vient se déverser, par son orifice supérieur qu'on a eu soin d'évaser, dans un récipient annulaire, duquel partent des tuyaux de distribution. Au moment où le déversement cesse, la totalité de l'appareil, composé des tuyaux fixe et ascensionnel, se trouve remplie d'eau à l'état de repos, et comme l'orifice du tuyau ascensionnel est au-dessus du niveau de l'eau dans le bassin supérieur, il se produit une *oscillation en retour* du tuyau ascensionnel vers la source ou bassin supérieur.

« Si la hauteur et la capacité intérieure du tuyau ascensionnel sont convenablement proportionnées, l'oscillation en retour sera terminée, et la vitesse de la colonne d'eau redevenue nulle, au moment où la surface de l'eau sera arrivée, dans le tuyau ascensionnel, à peu près à la hauteur du niveau de l'eau dans le canal de décharge. A cet instant, le tuyau ascensionnel est soulevé de nouveau par l'action du contre-poids; une nouvelle période de mouvement, entièrement semblable à la première, commence, et ainsi de suite indéfiniment.

« Pour mieux faire comprendre les circonstances et les causes du jeu régulier de la machine dont nous venons de donner une description générale, nous indiquerons les dimensions de la machine d'essai établie par M. de Caligny dans un jardin maraîcher des environs de Versailles, et que les membres de votre Section de Mécanique agricole ont vue fonctionner. Les produits de quelques petites sources sont retenus dans un bassin par une digue, au bas de laquelle est un fossé qui sert de canal de décharge. La hauteur des eaux dans le bassin au-dessus du canal est d'environ $0^m,70$. Un tuyau en zinc de $11^m,20$ de longueur et $0^m,20$ de diamètre intérieur,

traverse la digue et reçoit l'eau du bassin par un orifice évasé, au devant duquel est placé un grillage grossier. Ce tuyau, couché horizontalement, ou avec une faible inclinaison, dans le fossé, se recourbe près du bout par un coude arrondi, de manière que l'axe ait la direction verticale; son orifice d'écoulement se trouve à $0^m,35$ environ au-dessous du niveau de l'eau dans le fossé. Autour du bout relevé verticalement est un petit massif de maçonnerie, arasé horizontalement à la hauteur de l'orifice; le rebord de cet orifice, formant le siège sur lequel vient s'appliquer le collet en forme de bride, fixé à la base du tuyau ascensionnel, est dans le plan supérieur de la maçonnerie. Le tuyau ascensionnel est également en zinc; il a $2^m,13$ environ de longueur totale et un diamètre intérieur de $0^m,23$. Le diamètre de son orifice inférieur est $0^m,20$ comme celui de l'orifice du tuyau fixe sur lequel il doit s'appliquer exactement. A partir du bas est ménagé un évasement graduel qui porte le diamètre à $0^m,23$, ainsi que nous l'avons dit. Son orifice supérieur par lequel l'eau doit se déverser, est évasé. Sa partie centrale, dans le haut, est occupée par un cylindre plein et fixe, de $0^m,165$ de diamètre, terminé en pointe vers le bas, qui descend jusques un peu au-dessous du niveau de l'eau dans le bassin supérieur, c'est-à-dire d'environ $1^m,14$ dans l'intérieur du tuyau, et réduit la section de la colonne d'eau en mouvement, sur cette hauteur, à une surface annulaire de $0^m,165$ de diamètre intérieur et $0^m,23$ de diamètre extérieur. La limite supérieure de l'excursion du tuyau mobile ascensionnel, ainsi que la quotité du contre-poids, peuvent être réglées à volonté. L'orifice inférieur est entouré, avons-nous dit, d'un collet qui doit s'appliquer exactement sur le siège formant rebord autour de l'orifice du tuyau fixe; ce collet lui-même se prolonge en une surface annulaire, convexe vers le bas et à bords retroussés, comme le seraient ceux d'un parapluie renversé. Le diamètre total de ce bord en surface courbe est de $0^m,45$.

« Lorsque la machine ne doit pas fonctionner, on arrête le balancier auquel sont impendus le tuyau mobile et le contre-poids, de manière à soulever ce dernier. Le tuyau mobile reposant alors sur son siège par l'effet de son propre poids, l'écoulement des eaux vers le canal de décharge est interrompu. Pour mettre la machine en jeu, il suffit de rendre la liberté au balancier, et, au besoin, d'agir avec la main dans le même sens que le contre-poids, pour soulever le tuyau mobile. L'eau motrice sort alors par l'intervalle entre celui-ci et le tuyau fixe. Quand elle a pris une vitesse d'écoulement suffisante, le tuyau vertical, tiré vers le bas, descend en

soulevant le contre-poids, s'applique sur son siège, et le fonctionnement est régulièrement établi.

« Dans l'expérience à laquelle nous avons assisté à Versailles, le jeudi 25 mars dernier, la hauteur de chute était de $0^m,677$; l'eau était élevée à $1^m,05$ au-dessus du niveau dans le bassin de retenue, et par conséquent, à $1^m,727$ au-dessus du niveau dans le fossé servant de canal de décharge. Le rebord du tuyau fixe formant siège du tuyau mobile était de $0^m,376$ en contre-bas du niveau de l'eau dans le fossé; la levée du tuyau ascensionnel était limitée à $0^m,059$. Chaque période complète de mouvement de la machine durait régulièrement huit secondes, et fournissait un peu plus de 12 litres d'eau élevés à $1^m,05$ au-dessus de la source. Le tuyau ascensionnel restait appliqué sur son siège pendant quatre secondes, temps pendant lequel l'eau motrice n'allait point au canal de décharge. (D'après des observations postérieures qui ont été faites par M. de Caligny, en présence de plusieurs personnes, et qu'il nous a communiquées, la durée de l'élévation du tuyau ascensionnel est de $0^s,6$: il reste stationnaire au sommet de sa course pendant deux secondes, temps pendant lequel l'orifice d'écoulement vers le canal de décharge est complètement ouvert; enfin il emploie $1^s,4$ à redescendre.) Nous n'avions malheureusement aucun moyen de mesurer le volume d'eau dépensé à chaque période, et par conséquent nous ne saurions indiquer le rapport de l'effet utile au travail dépensé. Il est juste d'observer que la machine a été abandonnée, sans qu'on en ait pris soin, pendant tout l'hiver, qu'elle a pu subir quelques avaries, qu'il est assez probable que les garnitures des collets des tuyaux fixe et mobile ne sont point en bon état et ne procurent pas une occlusion parfaite. M. de Caligny déclare que, dans des expériences faites avant l'hiver, le volume d'eau élevé sous la même chute, à chaque période, était de 16 litres au lieu de 12, ainsi que nous l'avons trouvé. La diminution du produit serait la conséquence des avaries. Nous n'avons pu vérifier ces faits.

« Revenons maintenant sur les circonstances et les causes du jeu de la machine, et à cet effet considérons d'abord l'appareil au moment où le déversement vient de cesser à la partie supérieure du tuyau ascensionnel et où l'oscillation en retour vers la source va commencer. Il est aisé de reconnaître que, en raison des dimensions que M. de Caligny a données au vide intérieur du tuyau ascensionnel, cette oscillation en retour doit se terminer à très-peu près, lorsque la surface de l'eau, dans le tuyau vertical, est arrivée au niveau ou un peu au-dessous du niveau de l'eau dans le fossé de

décharge. A ce moment, si le tuyau ascensionnel est exactement équilibré par le contre-poids, il doit commencer à se soulever; car il n'existe plus, dans son intérieur, une colonne d'eau qui, par sa pression sur la paroi évasée contiguë à son orifice inférieur, tende à le maintenir appliqué sur son siège. Il se lève lentement, puisqu'il emploie à peu près 6/10 de seconde à parcourir $0^m,06$. Il reste stationnaire au sommet de son excursion pendant deux secondes; l'orifice d'écoulement est alors ouvert en plein; l'eau s'écoule au fossé de décharge avec une vitesse graduellement croissante (on peut s'assurer, par le calcul, que sa vitesse finale doit être à peu près de $1^m,146$ par seconde). Alors se manifestent les effets de cette force qui sollicite le tuyau ascensionnel vers le bas, et le détermine à descendre, force qui procure, en réalité, le jeu spontané de la machine, et donne à l'œuvre de M. de Caligny un caractère incontestable de nouveauté. Elle peut être due en partie à l'ascension de l'eau jaillissante du tuyau fixe dans le tuyau ascensionnel, qui presse, en vertu de son poids et du mouvement curviligne des filets, la paroi intérieure évasée contiguë à l'orifice; mais elle a aussi sa source dans l'action que l'eau, qui s'écoule dans le canal de décharge exerce sur le rebord, en forme de parapluie renversé, adapté autour du collet inférieur du tuyau ascensionnel. L'influence de ce rebord a été constatée par les expériences directes de M. de Caligny. Il fait remarquer que le fait dont il s'agit a des analogues dans le phénomène de la diminution de pression sur les parties voisines des bords de la face antérieure d'un prisme exposé au choc d'une eau courante, qui a été observé par du Buat, et dans celui de la pression dite *négative*, cause de l'augmentation de dépense par les ajutages coniques divergents. Quoi qu'il en soit des causes que nous ne voulons pas discuter ici, la force développée est progressivement croissante, ainsi que le prouve la lenteur avec laquelle le tuyau descend, en soulevant le contre-poids; il met $1^s,4$ à parcourir $0^m,06$. Cette lenteur est à la fois un avantage et un inconvénient : un avantage, parce qu'elle prévient des chocs destructeurs; un inconvénient, parce que l'eau, continuant à couler dans le canal de décharge par un orifice qui devient de plus en plus petit, prend une vitesse qui approche de plus en plus de celle qui est due à la charge totale de l'eau en amont de cet orifice. La chute de l'eau qui est sortie par un orifice rétréci contribue ainsi très peu à augmenter la vitesse de la colonne contenue dans le tuyau et, par suite, est à peu près entièrement perdue pour l'effet utile. Il nous paraît donc certain que, si la descente du tuyau était rendue plus rapide comme elle le serait par

la suppression momentanée, totale ou partielle, du contre-poids, l'effet utile de la machine serait sensiblement amélioré.

« M. de Caligny a construit, à l'aide d'un fonds peu considérable mis à sa disposition par M. le Ministre des Travaux publics, une machine d'essai de très grande dimension semblable à celle de Versailles, et l'a appliquée à relever, dans le bief supérieur d'un canal, une partie de l'eau provenant de la vidange du sas. Les essais ont été faits près de Saint-Lô, sur la Vire canalisée. Le tuyau de conduite avait ici 17 mètres de longueur et $0^m,625$ de diamètre; le diamètre du tuyau ascensionnel était de $0^m,73$. Tous deux étaient en zinc. La machine a fonctionné régulièrement, sans choc nuisible. Les essais ont été interrompus par la saison rigoureuse.

« Les détails dans lesquels nous sommes entré mettent en évidence le caractère de nouveauté propre à la machine imaginée par M. de Caligny, et la simplicité extrême de sa construction, qui nous paraît surtout devoir lui mériter les suffrages de la Société d'Agriculture; ils montrent aussi les études et les expériences nombreuses, qui restent à faire à l'inventeur, pour déterminer les formes les plus avantageuses des diverses parties de sa machine, les conditions les plus favorables à son établissement sous diverses chutes et pour des élévations d'eau à des hauteurs plus ou moins considérables par rapport à la chute motrice, enfin le rapport du travail utilisé au travail dépensé dans chaque cas. Nous avons l'espérance qu'il complètera son œuvre, et nous vous proposons de lui décerner, à titre d'encouragement, votre médaille d'or à l'effigie d'Olivier de Serres, pour l'invention de la machine à élever l'eau, dont il a établi un spécimen, qui fonctionne régulièrement dans un jardin maraîcher, boulevard Saint-Antoine, 23, près Versailles, en lui réservant d'ailleurs, tous ses droits pour l'avenir, aux récompenses d'un ordre plus élevé, dont la Société dispose. Ces conclusions sont adoptées. »

Voici la légende des figures relatives à ce système.

Figure 23, planche VIII, état de repos, ABCD tuyau de conduite fixe. EFGH tuyau en tôle mobile guidé par les tiges IKLM. NO flotteur qui lui est attaché. PQ réservoir recevant l'eau élevée. R bief d'amont. R' bief d'aval. SS poignées pour lever le tuyau mobile. T pièce fixe cylindrique en bois. YZ armature en fer reliant la pièce fixe T aux guides XXX, le diamètre du tuyau EFGH est plus grand que celui de l'extrémité EF.

l'eau qu'il contient presse la couronne EF et le tient fermé. Le niveau de PQ est au-dessous de GH. Le tuyau ABCD doit être assez long.

Figure 24. Le tuyau mobile est levé, il reste soutenu par le flotteur, l'eau du bief d'amont s'échappe par l'espace annulaire UU, le niveau VV dans ce tuyau est descendu près du niveau R', parce que la colonne liquide du tuyau de conduite a résisté par son inertie à la pression du bief d'amont. Ce niveau VV se relève jusqu'à une certaine hauteur dépendant du degré de vitesse qu'on laisse prendre à l'eau motrice, mais cela se fait graduellement. Enfin quand cette vitesse est assez grande, le tuyau mobile redescend en vertu d'un phénomène de succion à contre-courant, sur lequel j'ai donné des détails dans le première partie. La pièce fixe T permet d'augmenter la hauteur de versement et même l'effet utile dans certaines limites.

Figure 25. Le tuyau mobile étant revenu dans sa position première, l'eau s'élève en vertu de sa vitesse acquise, et se déverse au sommet, à une hauteur dépendant de la section de ce tuyau restée libre autour de la pièce T. Il se fait ensuite une oscillation en retour. Le tuyau vertical se vide, et lorsque le niveau est redescendu à une certaine profondeur au-dessous de celui du bief d'amont, le tuyau mobile se relève comme dans la figure 24 n'étant plus assez retenu par la pression sur la couronne EF.

Figure 26. Coupe horizontale. XXX guides verticaux. III tiges attachées au tuyau mobile et glissant le long des guides.

Figure 27. Forme rustique de l'appareil sur laquelle a été fait le rapport de M. Combes, il est avec balancier ABC sans flotteur, sa collerette relevée extérieurement comme une sorte de *parapluie renversé*, étant traversée par des guides fixes verticaux CD (voir aussi pour le balancier la figure 14). Cette forme de l'appareil est celle qui a été spécialement étudiée. Le système sans autre pièce mobile qu'un tube avec flotteur n'a été essayé qu'en petit.

Principes d'une autre forme de l'appareil à oscillation de hauteurs indéfinies, sans retour sensible vers le bief d'amont.

Je suppose que le tube oscillant, au lieu d'être à l'extrémité du système, puisse communiquer alternativement avec un tuyau placé en aval et montant beaucoup plus haut que le niveau du bief d'amont. Au lieu de verser l'eau par le sommet du tube mobile, on pourra produire une oscillation latérale dans le tuyau dont je viens de parler. De sorte que ce sera par ce dernier que l'eau élevée passera en définitive. Soit que l'on interrompe alternativement la communication avec le tube d'amont, soit que celui-ci ait une assez grande longueur pour que la colonne d'eau qu'il contient fasse, en temps utile, fonction de soupape, il est clair que l'appareil peut manœuvrer comme je viens de l'expliquer, le tube vertical mobile pouvant être convenablement vidé par une oscillation latérale dans le véritable tuyau d'ascension. On supposera d'abord que celui-ci peut être en temps utile fermé d'une manière quelconque.

Il est à remarquer que les choses pourraient ainsi être disposées de manière à éviter une perte de temps qui provenait d'une oscillation en retour. Mais, comme je l'ai dit ci-dessus, il est très intéressant de n'avoir que des soupapes gardant l'eau dans un seul sens. Il s'agit de voir pour quelles conditions cela est possible.

Je suppose d'abord qu'on veuille élever l'eau par le sommet du tube mobile, et que celui-ci soit disposé vers le milieu d'un tuyau de conduite horizontal, débouchant à ses deux extrémités dans des réservoirs au niveau du bief d'amont. Chacune des deux parties du tuyau horizontal aura, par hypothèse, un clapet ayant pour but d'empêcher l'eau de revenir en arrière.

Si, après avoir levé le tube vertical une première fois, on le laisse se baisser en temps utile, l'eau montera d'abord jusqu'au niveau du bief supérieur. On fait préalablement abstraction du mouvement de l'eau dans le coude et des résistances passives. Le liquide continuant à monter tendra par la réaction à diminuer la vitesse de la colonne liquide d'amont, et à en produire de plus en plus en aval, jusqu'à ce que les vitesses soient égales dans ces deux parties, le tuyau vertical étant d'abord par hypothèse indéfiniment prolongé. La colonne liquide commencera alors à descendre. Elle agira sur la partie d'amont pour tendre à la réduire au repos, tandis qu'elle augmentera la vitesse de l'eau dans celle d'aval. On conçoit qu'abstraction faite des causes de déchet, toute la force vive de la colonne liquide d'amont pourrait passer dans l'autre. La hauteur obtenue dans le tube vertical augmentera dans des limites très étendues avec la quantité d'eau sortie à chaque période au bief inférieur. Il est facile de voir que, s'il n'y avait pas de cause de perte de force vive, la hauteur obtenue à chaque période dans le tube vertical serait proportionnelle à la racine carrée de la quantité d'eau passée au bief d'aval pendant cette même période dans certaines limites.

On voit, d'après cela, qu'il tend à se faire une oscillation descendante d'autant plus profonde que la quantité dont je viens de parler sera plus considérable et qu'elle pourrait par conséquent descendre, si l'on voulait, à des profondeurs bien plus grandes que celle du niveau du bief inférieur. On peut demander si ce résultat ne serait pas empêché par l'eau, pouvant revenir du tuyau d'amont à partir de l'époque où la colonne liquide commence à descendre au-dessous du niveau du bief supérieur. Mais la colonne liquide verticale pouvant, comme je viens de l'expliquer, descendre d'une hauteur bien autrement grande que celle de ce niveau, l'eau qui pourra venir du bief d'amont n'aura le temps d'occuper qu'une petite fraction de la partie du tube vertical comprise au-dessous de lui.

On conçoit, d'après ce que je viens d'expliquer, qu'au lieu de faire descendre la colonne liquide bien au-dessous du niveau du bief d'aval, on peut la faire verser par une oscillation latérale beaucoup au-dessus du niveau d'amont. Il ne sera pas nécessaire, comme je l'avais supposé provisoirement, d'avoir une soupape gardant l'eau dans les deux sens. Il suffira que l'eau élevée par une oscillation latérale soit empêchée au moyen d'un clapet de revenir en arrière.

Ces effets peuvent être variés par le choix du rapport entre les parties d'amont et d'aval du tuyau de conduite. Il sera très convenable que le tuyau de décharge supérieur soit en général graduellement évasé. Quant au clapet du tube d'amont il y a lieu d'espérer qu'on pourra le supprimer. La disposition dont je viens de parler est moins simple que celle qui est décrite dans le rapport précédent. Mais elle a l'avantage d'éviter les oscillations en retour et même de faire en sorte que l'eau ne se repose jamais dans le tuyau de conduite. Cela est intéressant notamment pour les cas où l'on a non seulement à élever de l'eau mais à la conduire à de grandes distances. Enfin cela permet d'avoir un débit plus grand avec des tuyaux de conduite de diamètres moindres.

Il ne faut pas se dissimuler que le travail perdu en résistances passives par l'oscillation latérale dépassera beaucoup celui qui serait absorbé par une oscillation en retour vers le bief d'amont, si l'eau élevée se versait par l'extrémité du tube mobile. En effet, dans ce dernier cas, les choses sont disposées de manière que l'oscillation descendante ait seulement à vider ce tube jusqu'au niveau du bief inférieur. C'est aussi seulement jusqu'à ce niveau que le tube mobile doit se vider quand l'eau élevée se verse par une oscillation latérale. Mais alors l'amplitude de l'oscillation descendante est bien autrement considérable puisque, sauf les résistances passives, la colonne d'eau devrait se transporter aussi à la hauteur de son centre de gravité. Or celui-ci est à la hauteur à laquelle l'eau doit être élevée au lieu d'être à celle du niveau d'amont.

Si, toutes choses égales d'ailleurs, le travail qui serait nécessaire pour conserver les vitesses comme s'il n'y avait pas de causes de déchet, est proportionnel au cube de l'amplitude de l'oscillation, d'après ce qui a été dit dans la première partie, on voit immédiatement qu'il y a dans cette disposition, outre la nécessité d'ajouter un clapet de retenue, une cause notable de déchet qui n'existe pas dans l'appareil à tube oscillant avec oscillation en retour vers le bief d'amont. Il est donc bien entendu qu'il s'agit spécialement des cas où l'on a à conduire de l'eau à de grandes distances au lieu d'avoir seulement à l'élever et que l'appareil, tel qu'il a fonctionné aux expositions universelles de 1855 et 1867, doit être, en général, préféré.

Appareil versant de l'eau à plusieurs hauteurs par des tubes latéraux.

Il y a une autre modification qui semble très pratique. Je veux parler du cas où l'on aurait à élever de l'eau à plusieurs hauteurs ou au moins à deux différentes. L'eau peut se verser en partie au sommet du tube vertical mobile, et en partie par un tube latéral ou plusieurs tubes latéraux ayant des clapets de retenue. En effet, les longueurs développées de ces tubes peuvent être calculées de manière que l'eau, en montant dans le tube vertical au-dessus des autres points de versement, n'y fasse arriver le liquide qu'avec des vitesses ne dépassant pas certaines limites. Quand l'eau se sera versée au sommet du tube vertical, elle tendra à faire une oscillation en retour. Or les choses peuvent être combinées avec le mouvement de l'eau dans les tubes latéraux, dont les clapets y empêcheront d'ailleurs au besoin le liquide de revenir en arrière, ainsi le tube vertical peut être vidé par une oscillation en retour qui lui permettra de se relever en temps utile, et ainsi de suite indéfiniment. Il est à remarquer que le mou-

vement de l'eau dans les tubes latéraux dont il s'agit contribuera à vider le tuyau vertical si, à cause de la longueur de ces tubes, il s'y trouve encore des vitesses quelconques à l'époque où le niveau de la colonne liquide oscillante sera descendue au-dessous de celui du bief d'amont.

Considérations théoriques. — Influence des quantités d'eau motrice sur le rendement.

Ces considérations ont une très grande analogie avec celles des pages 771 à 773. Cependant le cas est moins simple, notamment parce que le mode d'introduction de l'eau sous une soupape annulaire automatique dans l'appareil pour les épuisements dont il s'agissait, laisse plus de liberté pour allonger le tuyau de conduite que le phénomène de succion à *contre-courant* employé pour la machine, objet spécial de ce chapitre. Si l'on fait provisoirement abstraction de ce détail, il est facile de voir que le travail qui serait nécessaire pour conserver les vitesses de l'eau pendant l'écoulement au bief inférieur et pendant le versement au sommet de l'appareil, comme s'il n'y avait pas de résistances passives, serait proportionnel, à chaque période, au carré du volume d'eau motrice descendu au bief inférieur dans cette même période. De sorte que le rapport de cette quantité de travail à ce volume d'eau serait encore pour cette machine en raison directe de celui-ci, malgré les différences dans les coefficients des résistances passives.

Nous savons qu'abstraction faite de toute élévation d'eau, il faut d'abord que l'oscillation soit entretenue dans ce genre d'appareils. Le travail qui serait nécessaire pour cela peut donc être considéré comme une *constante*. Ainsi voilà encore pour cette machine, une quantité, dépendant d'ailleurs de la forme du tube d'ascension et de la pièce fixe disposée à son

intérieur, qui sera en raison inverse de la quantité d'eau motrice dont il s'agit.

Quant au surcroît de travail en résistances passives provenant pendant l'ascension, jusqu'à ce que le sommet du tube soit atteint, de la vitesse qui était acquise avant l'interruption de l'écoulement au bief d'aval, si l'on admet qu'il est proportionnel au quarré de cette vitesse acquise, proportionnel lui-même à peu près à la quantité d'eau motrice descendue, il ne pourra pas servir à déterminer le volume d'eau qui conduira au maximum de rendement.

On retrouverait donc des conditions analogues à celles qui ont été signalées pour l'appareil d'épuisement précité. Mais on ne doit pas se dissimuler que les conditions, abstraction faite même des différences résultant du mode de succion et de la pièce fixe centrale, sont moins simples à divers égards. Pendant l'écoulement de l'eau motrice au bief d'aval, la percussion du liquide de bas en haut soutient, dans le tube mobile, une petite colonne d'eau, dont la hauteur augmente graduellement et qui, dans le cas où cet écoulement serait très prolongé, pourrait même remplir une partie considérable du tube comprise au-dessous du niveau d'amont.

Avant d'entrer dans plus de détails, il est intéressant de reprendre l'examen du cas le plus simple, étudié pages 771 et 773. La démonstration donnée, page 480, d'une formule fondamentale pour ce genre de recherche a été d'abord présentée seulement comme la vérification d'un résultat supposé connu. Or, il n'est pas sans quelque intérêt, relativement à toute cette classe d'appareils, de montrer par l'exemple le plus simple, celui d'une machine pour les épuisements précitée, comment la question peut être posée de manière à être résolue directement au moyen du calcul différentiel. Cela offre d'ailleurs l'avantage d'indiquer quelques propriétés secondaires, et de montrer comme on peut traiter d'une manière analogue diverses questions.

Si l'on suppose, pour simplifier, la chute motrice égale a l'unité, le travail dépensé à chaque période sera exprimé par la quantité x du poids de l'eau descendu en aval dans cette même période. Dans l'hypothèse où il n'y aurait pas de cause de déchet, le travail recueilli serait aussi exprimé par x. Mais, ainsi que je l'ai expliqué ci-dessus, celui qui serait nécessaire pour conserver les vitesses, comme s'il n'y avait pas de causes de déchet pendant l'entrée de l'eau motrice et pendant celle de l'eau à épuiser, serait proportionnel à x^2. Nous avons vu qu'à chaque période il y a une même quantité c de travail indispensable pour entretenir l'oscillation. Une autre quantité de travail proportionnelle à x serait nécessaire, comme je l'ai expliqué aussi, pendant la descente depuis le niveau supérieur au niveau de l'eau à épuiser, pour conserver les vitesses comme s'il n'y avait pas de déchet.

Dans le cas où toutes les résistances passives seraient considérées selon les hypothèses précitées, le rendement serait, en désignant par B et D deux coefficients constants, $\frac{x - \mathrm{B}\,x^2 - \mathrm{D}\,x - c}{x}$, il est bien entendu que toutes ces quantités représentent des nombres.

Différentiant et égalant la différentielle à zéro, on trouve que pour obtenir le maximum du rendement il faudrait avoir $\mathrm{B}\,x^2 = c$. La quantité d'eau motrice dépensée à chaque période serait proportionnelle à la racine carrée de la constante. Je n'entrerai pas ici dans les détails de ce genre. L'essentiel était de trouver directement un résultat, signalé et développé d'ailleurs d'une autre manière ci-dessus, ce qui confirme bien la règle suivante. Le travail perdu exprimé par la constante c doit être, dans ces hypothèses, égal à la quantité de travail perdu pendant l'entrée de l'eau motrice et pendant l'entrée de l'eau à épuiser.

Ainsi que je l'ai expliqué pour d'autres appareils, cette règle ne doit pas être appliquée sans réserve, notamment à cause de la manière dont les résistances passives sont dimi-

nuées par la raison même qu'elles diminuent les vitesses de l'eau.

Il faut pour la machine, objet spécial de ce chapitre, avoir égard à d'autres conditions indiquées ci-dessus, d'autant plus que la pièce centrale fixe modifie les vitesses avec lesquelles se fait le versement au sommet du tube. Quant à cette dernière considération, on peut évidemment en tenir compte. Il est d'ailleurs facile de voir que, dans des limites assez étendues, la règle précédente convenablement interprétée peut guider les constructeurs d'une manière utile. Ainsi on est conduit à penser, pour un appareil de grandes dimensions essayé aux anciens bassins de Chaillot, que les quantités d'eau, qui auraient donné le maximum de rendement, auraient dû être moindres que celles qui ont été employées le jour d'une expérience officielle dont je vais parler. C'est précisément le contraire de ce qu'on croyait avant que j'eusse développé cette théorie. Je donnerai plus loin le détail d'autres expériences qui confirment cette indication.

Quant à la longueur du tuyau de conduite, on sait par expérience qu'elle doit être assez grande par rapport à la hauteur de chute, et il convient, comme je l'ai dit pour un autre appareil, page 779, qu'elle ne soit pas moindre que celle qui conduirait au maximum de rendement pour des conditions données de vitesses d'eau motrice descendant au bief d'aval. Les considérations de ce genre ont une grande analogie pour plusieurs de mes appareils, en tenant compte de quelques différences dans le mode d'action des phénomènes.

On ne doit pas se dissimuler, pour plusieurs de mes systèmes, que la question est un peu compliquée par les phénomènes de succion, employés pour obtenir une marche automatique. J'ai dit quelques mots du genre de difficultés qui en résultent pour des calculs analogues à ceux dont il s'agit. Voir les pages 693, 694 et 697. Il est donc à remarquer qu'il ne s'agit ici que de bien indiquer la marche des résultats, et

les limites dans lesquelles on pourra être guidé par une règle très simple, mais qu'il faut savoir interpréter. Quant à la quantité *c*, elle ne résulte pas seulement du frottement et des autres causes de déchet indiquées ci-dessus, mais aussi du travail nécessaire, à chaque période, pour faire alternativement relever et redescendre le tube mobile. Cela dépend de phénomènes de succion encore peu connus surtout relativement à cet appareil. Une remarque analogue doit être faite relativement à plusieurs autres machines de mon invention, pour lesquelles je ne l'ai peut-être pas assez signalée. Elle a plus ou moins d'importance, à cause des divers phénomènes de succion qui servent à les faire fonctionner, des différences dans l'inertie des masses solides à mouvoir alternativement, etc. On voit que ce n'est pas sans réserve qu'elle peut être considérée comme une constante.

Expériences sur le rendement de l'appareil.

Je dois d'abord transcrire le procès-verbal d'une expérience en grand sur la forme de l'appareil objet du rapport précédent de M. Combes. Je donnerai ensuite la description des expériences faites depuis cette époque, et qui permettent d'augmenter beaucoup le rendement dans certaines conditions.

Note de M. Corot sur des expériences faites par M. de Caligny aux bassins de Chaillot.

« Dans le courant de l'année 1852, M. de Caligny fit établir dans « l'un des anciens bassins de Chaillot un appareil hydraulique de « son invention. Cet appareil se composait d'abord d'une conduite « ayant une longueur développée de 38 mètres et disposée en grande « partie horizontalement sur le fond du bassin; la conduite était « formée par des tuyaux en fonte de $0^m,60$ de diamètre intérieur.

« L'une des extrémités de la conduite se relevait à angle droit et « pénétrait verticalement dans le fond d'une cuve en bois de $3^{m},10$ « de diamètre, et placée de manière à pouvoir être remplie à une « hauteur d'environ $1^{m},50$ au-dessous du niveau d'un réservoir « voisin du premier, et qui servait de bief supérieur pour l'alimen- « tation de la machine ; l'autre extrémité de la conduite se relevait « également à angle droit jusqu'à un plancher horizontal en bois, « établi dans le bassin, où était placée la conduite; au niveau de ce « plancher une rondelle en cuivre ajustée et de $0^{m},57$ de diamètre « était fixée sur la bride en fonte, terminant la partie verticale de « la conduite de $0^{m},60$ de diamètre. Sur la rondelle en cuivre repo- « sait librement un tuyau également en cuivre, et portant à sa « partie inférieure une rondelle pareille à celle qui était fixée sur « la conduite en fonte; ce tuyau en cuivre s'évasait en remontant « sur une longueur de $0^{m},50$ et en passant d'un diamètre de $0^{m},58$ « à un diamètre de $0^{m},78$; ce dernier diamètre était conservé sur « une longueur de $1^{m},90$, puis raccordé au moyen d'une partie co- « nique de $0^{m},30$ de longueur avec un tuyau d'un diamètre de $0^{m},67$, « persistant sur une longueur de $1^{m},70$. Enfin, le tuyau qui avait « 5 mètres de hauteur totale se terminait à sa partie supérieure par « un entonnoir de $0^{m},60$ de hauteur et de $0^{m},88$ de diamètre à son « extrémité la plus élevée; sur cet entonnoir était fixée une cu- « vette annulaire munie d'une goulotte, au moyen de laquelle l'eau « remontant dans le tuyau vertical était versée dans un réservoir « indépendant.

« A la partie inférieure du tuyau vertical était fixé un cône en « forme de parapluie renversé de $0^{m},415$ de longueur suivant la « génératrice et se relevant verticalement à la circonférence exté- « rieure de $0^{m},15$.

« Le tuyau vertical, reposant librement sur l'extrémité de la con- « duite en fonte avec laquelle il faisait joint par le moyen des ron- « delles en cuivre, pouvait être soulevé par l'intermédiaire d'un « balancier à l'un des bouts duquel il était fixé et qui portait au « bout opposé un contre-poids équilibrant et au delà le poids du « tuyau.

« Pour mettre l'appareil en mouvement, il fallait commencer à « soulever à la main le tuyau vertical en agissant sur l'extrémité du « levier indiqué précédemment; l'eau alors se mettait à couler en « vertu de la charge motrice entre l'extrémité de la conduite en « fonte et le bout du tuyau mobile soulevé. Après le temps néces- « saire pour que la veine sortante atteignît la vitesse convenable,

« on laissait retomber le tuyau mobile sur le tuyau fixe; l'intervalle « se fermait; l'écoulement s'arrêtait, et l'eau, en vertu de la vitesse « acquise, s'élevait dans le tuyau vertical, de manière à déverser « par-dessus les bords de l'orifice supérieur. Puis, la vitesse d'ascen- « sion venant à cesser, la masse d'eau contenue dans le tuyau mo- « bile refluait par la conduite en fonte vers le bief supérieur. Dès « que le tuyau mobile était convenablement évacué par l'eau, c'est- « à-dire quand le niveau dans ce tuyau était devenu inférieur au « point où commence le renflement, le contre-poids placé à l'extré- « mité du balancier, et qui était plus lourd que le poids du tuyau « vide, faisait remonter ce tuyau, et l'ouverture annulaire au-des- « sus de la conduite en fonte se trouvait de nouveau démasquée; « l'écoulement recommençait, et quand une certaine vitesse était « atteinte, un phénomène de succion, dû probablement à l'augmen- « tation de vitesse de la veine fluide, s'échappant entre les surfaces « du parapluie renversé et du plancher, déterminait une attraction « de haut en bas, qui devenait supérieure à l'excédant du contre- « poids, et précipitait le tuyau mobile sur l'orifice de la conduite « en fonte. Le tuyau mobile, quand le mouvement de retour de la « colonne liquide précédemment indiqué avait eu lieu, était de « nouveau soulevé par le contre-poids, et ses alternatives de « montée et de descente se produisaient d'elles-mêmes et réguliè- « rement.

« Dans le courant de l'année 1853, une expérience eut lieu en « présence de M. Dupuit, alors ingénieur en chef, directeur du ser- « vice municipal de la ville de Paris; de MM. Piobert, Combes et « Cagniard de Latour, membres de l'Institut; de M. Guichard, ins- « pecteur général; de M. Bélanger, ingénieur en chef des Ponts et « Chaussées, et de M. Corot, ingénieur civil. L'expérience fut pro- « longée pendant une heure; la chute moyenne, conservée sans va- « riation trop notable, était de $1^m,74$ entre le niveau moyen dans « la cuve de prise d'eau et le niveau du bief d'aval; la hauteur as- « censionnelle était de $2^m,72$ entre le point de versement à la partie « supérieure du tuyau mobile et le niveau dans la cuve de prise « d'eau; la quantité d'eau élevée fut de 85 mètres cubes et la quan- « tité d'eau dépensée fut de 355 mètres cubes, d'où résulterait un « effet utile de 0,34 (1) du travail moteur en eau élevée.

(1) Il y a une légère faute de transcription dans un chiffre de l'effet utile qui serait, d'après les données admises dans le procès-verbal, de 0,37 au lieu de 0,34. On trouve en effet $2,72 \times 85 = 231,20$ et

« Il convient d'ajouter qu'indépendamment de l'imperfection in-
« séparable de l'installation d'un appareil d'essai, deux circons-
« tances surtout ont dû amoindrir le résultat utile. D'abord le ver-
« sement, par la partie supérieure du tuyau mobile, avait lieu
« précisément pendant la période d'abaissement du niveau dans la
« cuve, et comme l'abaissement total était d'environ $0^{m},44$, il aurait
« probablement été convenable d'augmenter la hauteur de verse-
« ment de la moitié de l'abaissement dans la cuve, soit de 0,22, et
« cette hauteur aurait été de 2,94, au lieu de 2,72.

« Puis il n'a pas été possible d'obtenir le volume d'eau sur lequel
« on avait cru pouvoir compter. Il en est résulté que les organes
« de l'appareil avaient des dimensions trop considérables; il a
« fallu, pour y remédier autant que possible, insérer dans le tuyau
« mobile une pièce de bois destinée à diminuer sa section libre. Il
« est infiniment probable qu'il en est résulté un trouble préjudi-
« ciable pour le rendement.

« Paris le 27 mai 1858. *Signé :* J. COROT, ingénieur civil, ex-inspec-
« teur des machines du service municipal de la ville de Paris.

« Vu et approuvé par le soussigné, ancien directeur du service
« municipal. Paris, le 28 mai 1858. *Signé :* DUPUIT.

« Je certifie que j'ai assisté à l'expérience dont les résultats sont
« rapportés dans cette Note et qu'elle contient un exposé exact des
« faits observés. *Signé :* CH. COMBES. »

Observations sur quelques détails de ces expériences.

En général, quand le bassin servant de bief d'amont n'a pas assez d'étendue pour que le niveau ne soit pas assez sensiblement constant, il faut tenir compte de ce que, pour tous les appareils de ce genre, c'est-à-dire seulement pour ceux où la force vive s'emmagasine dans une colonne liquide d'une manière analogue à ce qui se passe dans le bélier hydraulique avant la fermeture de la soupape d'arrêt, la vitesse dans cette colonne liquide augmentant graduellement, il se débite plus

$355 \times 1,74 = 617,70$. L'effet utile serait donc, d'après ces données de 0,37 plus une fraction. — Un 4 a été mis sans doute au lieu d'un 7 dans la copie. (*Note de l'Auteur.*)

d'eau, *pour qu'une vitesse donnée soit obtenue*, à l'époque où le niveau est baissé dans cette espèce de bief d'amont qu'à l'époque où il y est le plus élevé. Il en résulte que *la véritable moyenne des hauteurs d'où l'eau motrice descend est moindre* que la moyenne des hauteurs du niveau dans ce bief d'amont au-dessus du niveau d'aval, depuis l'origine du mouvement jusqu'à l'époque où la vitesse de sortie au bief d'aval est arrivée à son maximum.

Connaissant à peu près la manière dont la vitesse de sortie de l'amont à l'aval varie à chaque instant, il est aisé d'en conclure approximativement la hauteur véritable d'où le centre de gravité de l'eau motrice descend au bief d'aval.

Quand le niveau de ce dernier bief n'est pas non plus constant, il est juste aussi de tenir compte de ce que cela influe sur la véritable hauteur de chute comparée à ce qu'elle serait si ce bief était indéfini. Si la chute diminue, il faut à chaque période plus d'eau pour engendrer une vitesse donnée, et il en résulte que la chute motrice moyenne est moindre que la moyenne entre les hauteurs du niveau d'amont, supposé indéfini, au-dessus du niveau d'aval.

Quant à l'expérience précédente, si ces considérations ont peu d'importance, elles viennent cependant à l'appui de ce que dit le procès-verbal, que, dans le calcul de l'effet utile, on devrait admettre, par suite des variations de niveau, une notable augmentation dans le chiffre du résultat définitif tel qu'il le donne. Or, comme je l'ai indiqué en note par un calcul d'arithmétique sans y attacher d'importance, il y a une légère faute de transcription, de sorte qu'on peut admettre en nombre rond, d'après le procès-verbal, un effet utile *d'au moins* 40 pour 100 *en eau élevée*, dans l'expérience dont il s'agit, en tenant compte de ce qui a été expliqué surtout relativement aux divers effets de la baisse du niveau dans la cuve.

La pièce de bois fixe destinée à rétrécir les sections du tuyau vertical n'avait pas été unie et taillée avec assez de soin, étant

formée en partie de planches clouées sur un arbre de section quadrangulaire de $0^m,30$ sur $0^m,285$. Elle s'enfonçait d'ailleurs trop profondément dans le coude, où le diamètre de la partie inférieure arrondie en pointe était encore de $0^m,14$ à la hauteur de l'orifice de sortie. La partie de cette pièce de bois qui s'élevait au-dessus du niveau d'amont avait une section octogone de $0^m,46$ de diamètre prise entre deux faces parallèles; cette partie avait $2^m,80$ de long, elle s'élevait au-dessus du tuyau et se raccordait d'ailleurs supérieurement et inférieurement avec l'arbre de section rectangulaire quelque peu élargi par le sommet. Le raccordement en haut avait $0^m,13$ de côté, en bas il en avait $0^m,16$. Cet arbre se terminait inférieurement par une portion en pointe de $0^m,90$ de haut au bas de laquelle était un boulon avec clavette. Il reposait sur l'anneau ménagé au milieu d'une traverse en fer, posée de champ à une profondeur d'environ $0^m,10$ au-dessous du siège fixe. Le sommet de cet arbre étant retenu par des cordages attachés à environ un mètre au-dessus du tuyau reposant sur son siège, cette pièce de bois était invariablement fixée.

Un large plancher horizontal était disposé autour de l'orifice du tuyau de conduite portant la rondelle en cuivre qui servait de siège au tube mobile. On a d'abord fait marcher l'appareil sans la pièce de bois verticale dont je viens de parler. Il a souvent fonctionné même pendant plusieurs heures avant que le niveau de l'eau du réservoir d'aval eût atteint ce plancher. La nappe liquide annulaire venait s'appliquer contre le parapluie renversé. Bientôt il se produisait une succion puissante qui ramenait le tube sur son siège ainsi que cela a été expliqué dans la première partie. La durée totale de la période était de 17 1/2 secondes se divisant à très peu près de la manière suivante. Le tube ne reposait pas sur son siège pendant 5 1/2 secondes. A partir de l'instant où il y reposait, il fallait 3 secondes pour que l'eau arrivât jusqu'au sommet où le versement se faisait en 3 secondes. La durée de l'oscillation en retour était de 6 secondes. Les choses

étaient disposées de manière que la colonne liquide descendait très peu au-dessous du plancher.

Il est intéressant de conserver la trace de cette manœuvre du tube fonctionnant ainsi hors de l'eau du bief d'aval. Je l'ai montrée à une commission de l'Institut et à une commission de la Société centrale des architectes. Mais elle est évidemment défectueuse au point de vue de la pratique. La nappe annulaire formait une belle volute en perdant beaucoup de force vive, puisqu'elle était obligée de redescendre ensuite d'une certaine hauteur (1). Quand le tube retombait

(1) Cet appareil peut servir à faire des épuisements si l'on fait verser ainsi l'eau motrice un peu au-dessus du niveau du bief d'aval assez pour qu'elle ne puisse pas rentrer dans le système. Au lieu de faire élever de l'eau au sommet du tube vertical, on peut, en prolongeant celui-ci, obtenir une oscillation en retour assez puissante pour vider la partie fixe au-dessous du niveau de l'eau à épuiser. Si donc un système de soupapes permet à cette eau d'entrer dans l'appareil sans pouvoir repasser par le même orifice, il est clair qu'on aura une machine qui relèvera ensuite, jusqu'au-dessus du niveau du bief d'aval, l'eau qu'elle aura puisée à un niveau inférieur.

Ce système d'épuisement peut avoir quelques avantages quand on voudra, au moyen d'un même appareil, élever de l'eau au-dessus du niveau du bief d'amont, et en tirer d'une profondeur plus grande que celle du bief inférieur. Mais, dans les circonstances ordinaires, l'appareil décrit p. 770-771 sera préférable. En effet, dans ce dernier, la course des oscillations se fera en entier au-dessous du niveau du bief supérieur, tandis que, dans le système dont je viens de signaler le principe, c'est autour du niveau du bief d'amont que les oscillations devront se faire. On voit déjà, pour le cas où elles se feraient seulement dans la branche qui descend du bief supérieur, que, dans le système précité, n'ayant à descendre qu'à une même profondeur donnée, elles auraient beaucoup moins d'amplitude que pour celui dont je viens de parler où elles partiraient de beaucoup plus haut. Quant à la force vive développée par la descente directe de l'eau du bief d'amont à celui d'aval, et au travail en résistances passives qui en résulterait pendant cette descente, elle serait jusqu'à un certain point analogue dans les deux cas. Mais pour celui dont je viens de parler, l'eau motrice serait obligée de se verser un peu au-dessus du niveau du bief d'aval. Cela aurait les inconvénients que j'ai déjà signalés et d'ailleurs la succion qui ramène le tube sur son siège n'est pas la même que s'il est convenablement plongé.

Il reste à examiner le cas où l'on aurait à tirer l'eau à épuiser d'une

sur son siège, il rebondissait et perdait de l'eau, étant en quelque sorte comme un arbre agité par le vent. Son sommet n'était d'ailleurs guidé que par deux chaînes attachées sur une pièce de bois dont la courbure avait pour génératrice un arc de cercle et qui était posée à une des extrémités du balancier. Cet inconvénient était atténué quand le niveau de l'eau du bief d'aval se trouvait à une certaine hauteur au-dessus du siège fixe. Le *parapluie renversé* est alors un moyen de régulation analogue à celui qui résulte de la quille d'un navire employée à diminuer le tangage.

Il s'est présenté à Chaillot un effet intéressant par suite du mouvement des ondes dans le bassin d'aval, lorsque le niveau de l'eau en repos avant le jeu de la machine était à environ $0^{m},40$ au-dessus du siège fixe. Une atumescence se présentait sur l'extrémité inférieure du tube à l'époque précisément où cela était utile et il se présentait un creux, précisément

profondeur assez petite au-dessous du niveau d'aval par rapport à la hauteur de chute. Les conditions sont alors plus favorables. Le système précité obligerait de faire descendre l'oscillation beaucoup au-dessous du niveau de l'eau à épuiser, ce qui peut occasionner des difficultés de construction. Or, la disposition dont je viens de parler n'aurait à faire descendre l'oscillation qu'un peu au-dessous de ce niveau.

Mais quant aux résistances passives, la colonne liquide étant obligée de partir de beaucoup plus haut en refoulant la pression du bief supérieur, on retrouverait des causes de déchet analogues, même s'il ne s'agissait que d'entretenir l'oscillation. Il faudrait d'ailleurs tenir compte de ce que, ayant à engendrer la force vive nécessaire pour que la colonne en mouvement de retour vers le bief supérieur permette au liquide à épuiser d'entrer dans le système, l'eau devrait d'abord avoir été élevée plus haut que le double de la hauteur du niveau du bief d'amont au-dessus de celui du liquide à épuiser. La quantité d'eau qui, redescendant du sommet du tuyau vertical, aurait à engendrer la force vive qu'on doit trouver quand la soupape d'épuisement est ouverte, aurait ainsi à traverser deux fois ce tuyau. Il est donc bien entendu que si je signale ce moyen nouveau de faire des épuisements dont il est intéressant de conserver le principe, c'est surtout pour le cas où l'eau à épuiser serait à une profondeur assez petite par rapport à la hauteur de la chute motrice, et où le système précité occasionnerait des difficultés de construction.

aussi en temps convenable, pour favoriser la marche de l'appareil.

La rondelle inférieure étant réunie par un bout de tuyau conique à la portion la plus large du tube mobile, la pression de l'eau du bief d'aval tendait à le soulever. Ainsi, quand il y avait un creux provenant des ondes, c'était une raison de plus pour que le tube fût plus fortement appliqué sur son siège.

Mais il ne faut pas compter dans la pratique sur l'effet singulier de ces ondes et même, à Chaillot, je préférais laisser monter le niveau dans le bief d'aval assez haut, pour qu'on n'eût pas à tenir compte de ce genre de phénomènes. La marche était plus sûre quand les ondes qui en résultaient n'avaient pas d'importance, ce qui arrivait quand ce niveau était à une cinquantaine de centimètres au-dessus du siège fixe.

La pièce de bois verticale précitée avait pour but de diminuer, à chaque période, le chemin parcouru dans le tuyau de conduite, et de faire en sorte que l'oscillation en retour ne descendît point aussi bas. On conçoit, en effet, que si elle tend à descendre au-dessous du niveau du bief d'aval, quand le tube se relève, il en résulte un véritable *reniflement*, cause évidente de trouble et de perte de force vive ; puisque l'eau du bief inférieur rentre dans le système en vertu du mouvement acquis de la colonne liquide rétrograde. Mais un défaut de construction a conduit à une autre cause de déchet. L'espace occupé au-dessus du niveau d'amont par la pièce de bois dont la section avait été trop augmentée par des planches comme je l'ai expliqué, a été plus grand que cela n'était nécessaire pour diminuer convenablement la course de l'oscillation descendante. Il en est résulté que celle-ci n'a pas vidé le tube aussi bas que cela eût été utile le jour de l'expérience officielle précitée. De sorte qu'à l'époque où il s'est levé, il contenait encore, ainsi qu'on peut le calculer, une certaine quantité d'eau au-dessus du niveau du bief d'aval où elle est tombée en perdant de la force vive.

Cette pièce de bois diminuant d'ailleurs la durée des oscillations et la réduisant à 14 1/2 secondes par période, il fallait faire fonctionner le tube un plus grand nombre de fois pour une même quantité d'eau motrice. D'ailleurs les espaces étant resserrés par cette pièce, on conçoit que, même en la supposant taillée avec plus de soin qu'elle ne l'était, il en résultait des causes de perte de force vive, notamment quand la veine liquide ascendante se dilatait assez brusquement en arrivant au sommet.

Par suite des diverses causes dont je viens de parler, je n'ai pas remarqué que le rendement fût assez augmenté en général, par suite de la pose de cette pièce de bois, pour que les différences, si elles ont été bien réelles, ne puissent pas être attribuées à des erreurs d'observation.

Il y avait lieu de penser que, pour une même quantité d'eau motrice avec une chute donnée, plus la levée du tube serait grande, moins il y aurait de perte de force vive, les vitesses de sortie paraissant devoir être d'autant moindres que l'orifice d'écoulement serait plus grand. Mais les différences de rendement résultant de cette manœuvre n'ont pas été assez grandes pour ne point pouvoir être attribuées à des erreurs d'observation. Cependant les levées ont varié dans diverses expériences au moins de $0^m,12$ à $0^m,30$. La levée était d'environ $0^m,12$ le jour de l'expérience officielle précitée.

On conçoit que, si les vitesses de l'eau à la sortie sont moindres quand les levées sont plus grandes, c'est une première raison pour que les forces de succion qui tendent à ramener le tube sur son siège, soient diminuées. Par conséquent il n'est pas nécessaire que le contre-poids qui tient le tube levé malgré leur action soit aussi fort pour une vitesse donnée dans le tuyau de conduite, d'autant plus que le chemin qui doit être parcouru étant plus long la force de succion diminue par le seul fait de la distance de la surface qu'elle fera descendre; il faut d'ailleurs tenir compte de ce que, dans

les premiers instants si la veine liquide n'est pas aussi étranglée que pour une levée moindre, il n'y a pas autant d'inconvénient qu'on pourrait le croire au premier aperçu, à ce que les vitesses du tube soient petites au commencement de la descente.

Mais il y a lieu de penser que les vitesses de sortie de la nappe liquide appliquée immédiatement contre le *parapluie renversé*, ne sont pas diminuées à beaucoup près autant que paraît d'abord l'indiquer une augmentation de levée du tube. Cette marche des résultats semble s'accorder, comme on va voir, avec les observations que j'ai présentées dans la première partie (p. 127 et suivantes, p. 330 et suivantes) sur la manière dont une veine liquide s'*écrase* en augmentant sa vitesse, quand elle se détourne dans un coude, même lorsque la surface contre laquelle elle se courbe est à une distance notable de l'orifice d'où part cette veine.

On conçoit que l'avantage résultant d'une diminution quelconque dans la vitesse de sortie étant atténuée par suite de cet *écrasement* peut être compensé, du moins jusqu'à un certain point, par des inconvénients provenant de l'augmentation de durée de l'abaissement du tube. Quand il descend, il *coupe* la veine annulaire liquide, et cela ne peut se faire sans qu'il en résulte, à chaque instant, des déviations causes de pertes de force vive qu'on ne sait pas encore bien apprécier. Quelle qu'en soit d'ailleurs l'explication, il est d'autant plus utile de savoir qu'il n'est pas nécessaire d'augmenter la levée du tube au-delà de limites assez restreintes, que cela simplifie la construction et la manœuvre.

Pour se rendre compte du travail employé à faire fonctionner le tube mobile, il faut donner une idée des masses solides qui devaient être mises en mouvement à chaque période. On s'était servi de vieux matériaux qui étaient dans les ateliers du service municipal des eaux de Paris. Le tube mobile en cuivre pesait, autant que je peux m'en souvenir, au moins 300 kilogrammes. Il aurait été à désirer que la

cuvette annulaire destinée à recevoir l'eau élevée eût été fixe comme pour le modèle précité de Versailles. Afin d'éviter les frais d'un échaffaudage, on l'a attachée au sommet de ce tube dont elle a augmenté le poids d'environ 50 kilogrammes.

Il faut aussi tenir compte de la masse du balancier en sapin de $7^m,27$ de long. Sa section était un rectangle de $0^m,30$ de haut sur $0^m,18$ de large. Il était renforcé au moyen de deux tringles en fer se reliant à un morceau de bois pesant 12 kilogrammes posé au-dessus de l'axe. Une des extrémités du balancier portait un contrepoids formé de rondelles de plomb. Les ferrures de la tête de ce balancier, y compris les deux chaînes, pesaient 79 kilogrammes. L'ensemble du reste des ferrures du balancier pesait 82 kilogrammes. Le morceau de bois courbe sur lequel se pliaient alternativement les chaînes était relié par deux pièces de bois, l'une de $2^m,97$ de long, l'autre de $2^m,27$. Je n'ai pas assez exactement le poids de ces diverses pièces qu'il fallait mettre en mouvement alternatif. Mais ces détails suffisent pour donner une idée des masses qui devaient être animées de certaines vitesses à chaque descente, dont la durée était en général, autant que je peux m'en souvenir, d'environ une seconde pour une course d'une vingtaine de centimètres, ce qui peut servir à donner une idée de la vitesse avec laquelle se faisait la percussion du tube sur son siège. Mais quand même on connaîtrait exactement la durée dont il s'agit, cela ne suffirait pas pour déterminer cette vitesse, puisqu'on ne sait pas suivant quelle loi la force accélératrice de succion ramène le tube sur son siège. On sait seulement qu'elle augmente quand la distance du tube au siège diminue.

Mais la force vive quelconque des masses solides dont il s'agit aurait pu être employée à faire fonctionner une pompe qui aurait eu le double avantage d'amortir la percussion du tube sur son siège, d'augmenter un peu le rendement et d'empêcher le trouble pouvant résulter de ce que les mouve-

ments du contrepoids et du balancier faisant plier la chaîne, celle-ci, en se tendant de nouveau, est une cause d'agitation pour le tube.

En général, pour mettre cet appareil convenablement en train, il faut lever franchement le tube une première fois, quand on n'emploie pas de frein hydraulique ou un moyen quelconque de diminuer la percussion sur le siège. Lorsqu'on ne prend pas cette précaution, il peut se présenter des trépidations très violentes. Ainsi, même pour le petit appareil précité de Versailles, ces trépidations ont quelquefois été si fortes qu'on avait de la peine à s'en rendre maître.

Les tuyaux de fonte qui m'avaient été prêtés pour cette expérience faite à Chaillot étaient très vieux et leurs parois étaient extrêmement rugueuses. Je n'ai pas constaté si les rondelles de jonction, posées en mon absence, n'étranglaient point un peu quelques sections. Il est donc bien entendu que cette expérience, sur un système que j'ai d'ailleurs perfectionné depuis cette époque, doit être seulement considérée comme une étude provisoire dont il est intéressant de conserver quelques indications d'autant plus qu'elle a été faite sur une assez grande échelle. Les matériaux employés ne purent pas au reste m'être laissés aussi longtemps que cela aurait été nécessaire pour approfondir diverses questions sur lesquelles je reviendrai plus loin.

Ainsi l'on croyait que le rendement aurait été augmenté si la quantité d'eau motrice avait été plus grande. Or cette dernière ayant été une fois notablement moindre qu'à l'ordinaire, pendant plusieurs heures, je fus étonné de voir que le rendement n'était pas diminué et qu'il était plutôt augmenté. Je regrette de ne pas avoir conservé assez exactement la note de cette expérience parce que je la regardai comme une anomalie jusqu'à l'époque où, en 1867, je variai les expériences de manière à pouvoir me rendre plus complètement compte de la marche des résultats.

J'ai constaté à Chaillot que le niveau de l'eau du bief d'aval

pouvait monter considérablement sans que la machine s'arrêtât. La chute motrice, la moindre qu'on pouvait obtenir dans cette localité, était d'environ un mètre. Je dois dire que pour cette chute le rendement était alors sensiblement diminué.

A Chaillot il ne m'était pas possible de varier à volonté les quantités d'eau motrice. Quand la machine était réglée ainsi que son contrepoids pour une chute moyenne donnée, les conditions devenaient très différentes lorsque la chute diminuait, à cause de l'exhaussement du niveau d'aval. Ainsi que je l'ai dit, si l'oscillation en retour tendait à descendre au dessous de ce niveau, il y avait un reniflement occasionnant de la perte de force vive. Il n'est donc pas étonnant que le rendement ait été diminué quand on a réduit la chute motrice moyenne à un mètre. Mais il était bien intéressant de constater que sans rien changer, ni au contrepoids, ni à la levée du tube, l'appareil ne cessait pas de marcher régulièrement, étant abandonné à lui-même.

J'ai d'ailleurs remarqué que l'oscillation ne descendait point assez bas pour les conditions de l'expérience officielle précitée. Je n'ai pas eu le temps de varier les essais de manière à déterminer rigoureusement la chute qui aurait conduit au maximum de rendement. D'ailleurs en diminuant la hauteur d'où serait tombée l'eau motrice dont la quantité était déterminée, j'aurais été obligé de laisser prendre à cette eau des vitesses dont la *hauteur due* moyenne aurait été plus grande par rapport à la chute motrice. En résumé, je ne me suis pas aperçu dans ces expériences en grand faites à Chaillot sur une quantité d'eau motrice donnée, qu'il y eut beaucoup de différences de rendement pour des changements notables dans la hauteur de chute. Cela paraît pouvoir résulter de plusieurs compensations dont je viens de donner une idée. Dans ces conditions d'une installation provisoire, sur une grande échelle, le rendement obtenu parut satisfaisant aux savants et aux ingénieurs qui assistèrent à ces essais.

Depuis l'expérience officielle de 1843, on augmenta la section du passage de l'eau entre le réservoir d'amont et la cuve précitée afin de diminuer les variations du niveau de l'eau dans cette cuve, et les ondes qui se présentaient dans ce bassin à chaque oscillation en retour. Il en est résulté que celle-ci est descendue moins bas, et que, pour le niveau ordinaire de l'eau du bief inférieur, il restait dans le tube vertical au-dessus de ce dernier niveau une quantité d'eau qui, à l'époque de la levée de ce tube, tombait en aval en perdant de la force vive. De sorte qu'on n'eut pas l'augmentation de rendement sur laquelle on avait compté en modifiant ainsi l'introduction de l'eau dans la cuve servant en définitive de bief d'amont. Cette expérience est intéressante pour mieux faire voir combien il est utile de disposer convenablement la course de l'oscillation descendante (1).

Expériences sur une forme de l'appareil permettant d'augmenter la hauteur du versement.

A Versailles, au bassin dit de Picardie, en 1854, l'eau élevée par la machine de Marly arrivait encore au-dessus de ce

(1) Afin de diminuer la percussion du tube mobile sur son siège on avait essayé d'employer la résistance d'une pièce de bois flexible disposée au-dessous du balancier. Les essais ne furent pas assez prolongés pour constater quelle influence cette combinaison pouvait avoir sur le rendement. La percussion était moindre mais cela diminuait l'adhérence du tube sur son siège. Je préfère en général le frein hydraulique appliqué à l'écluse de l'Aubois. Voir planche VI. Je reviendrai cependant plus loin sur une application rustique d'un ressort de ce genre.

J'ai dû transcrire textuellement le procès-verbal rédigé par M. Corot. Mais je crois me souvenir que l'angle de la génératrice du parapluie renversé était à la fin des expériences un peu moindre qu'il ne l'a indiqué sans doute d'après les dessins sur lesquels l'appareil a été construit. On conçoit d'ailleurs qu'il peut être résulté de la dilatation du métal et du jeu de l'appareil quelques petites différences. En général je donne à l'angle de cette génératrice avec l'horizontale un sinus qui n'est pas moindre que le tiers du rayon.

bassin par un tuyau de plomb relevé verticalement. Un bout de tuyau horizontal posé à angle droit sur le premier versait l'eau dans ce bassin. En le bouchant avec un tampon je faisais monter l'eau dans une grande cuve d'environ $1^m,60$ de diamètre et $0^m,80$ de profondeur, dont le fond était traversé au centre par le tuyau vertical en plomb. Le sommet de celui-ci versait l'eau motrice dans cette cuve tenant lieu de bief d'amont. J'ai expliqué, page 319, comment on y amortissait les ondes résultant du mode d'introduction de l'eau de manière à connaître le véritable niveau moyen.

Un tuyau de fonte de 30 mètres de long et de $0^m,25$ de diamètre intérieur se raccordait avec un coude en zinc de même diamètre intérieur en quart de cercle, dont le rayon moyen était d'environ $0^m,60$, autant que je peux m'en souvenir, et qui traversait le fond de la cuve auquel il était adapté par un collet sans entonnoir. C'étaient des tuyaux à emboitements qui formaient la conduite de 30 mètres de long. L'autre extrémité de celle-ci se terminait par un bout de tuyau conique en zinc, d'environ $0^m,70$ de long recourbé verticalement, son coude en quart de cercle ayant un rayon intérieur d'au moins $0^m,20$, autant que je peux m'en souvenir. On avait disposé au-dessus de ce coude la tête de machine décrite dans un rapport précité de M. Combes, du 25 avril 1852, on avait fait quelques modifications au tube mobile dont l'anneau se raccordait avec le tube par un bout conique de $0^m,04$ de long, un autre bout conique de mêmes dimensions renforçait extérieurement ce tube et sa collerette relevée. A une hauteur de $0^m,19$ au-dessus de l'anneau inférieur du tube, on avait disposé un renflement cylindrique d'environ $0^m,45$ de long et $0^m,34$ de diamètre intérieur. Il se raccordait avec la partie inférieure précitée de $0^m,19$ au moyen d'un tuyau conique et se raccordait aussi avec la partie supérieure du tube au moyen d'un bout de tuyau conique de mêmes dimensions que l'autre, de sorte que la hauteur totale du renflement, formé de ces trois parties, était sensiblement de $0^m,68$ à l'intérieur. Le tuyau

cylindrique aussi en zinc, qui était soudé sur ce renflement, avait environ 0m,23 de diamètre au bas, 0m,225 au sommet, et 1m,18 de long. Quand ce tube reposait sur son siège le renflement était en entier au-dessous du niveau du bief d'amont. L'anneau inférieur attaché au tube mobile et reposant alternativement sur le siège fixe était plan par dessous, il avait 0m,03 de large, c'est-à-dire que son diamètre extérieur était de 0m,26. La collerette relevée extérieurement le dépassait d'environ 0m,12. Le sinus de son angle avec le plan horizontal était, autant que je peux m'en souvenir, le tiers du rayon. Le coude précité d'amont et le tuyau en zinc, de même diamètre que la conduite en fonte qui le reliait à celle-ci avaient une longueur développée de 2m,44.

Je n'ai pas conservé assez rigoureusement la hauteur de chute moyenne et la hauteur moyenne d'élévation au-dessus du niveau d'amont qui, à chaque période, variait quelque peu dans la grande cuve servant de bief supérieur. Mais je me souviens que cette chute était en général un peu moins de 0m,40, l'eau était élevée sensiblement au quadruple de la hauteur de chute au-dessus du niveau du bief d'aval.

On mesurait l'eau passée dans l'appareil au moyen du système employé au jaugeage par pouces d'eau du liquide élevé par la machine de Marly.

Quand l'eau sort sous le tube levé elle soutient, au-dessus du niveau d'aval, une colonne liquide dont la hauteur augmente graduellement. La masse d'eau qu'elle soutient ainsi est d'autant plus grande, pour une même vitesse de sortie, que le renflement qui la contient est plus large. Lorsque le tube retombe sur son siège, la percussion qui agit sur elle de bas en haut augmente assez vite, de sorte qu'à l'instant où le tube atteint son siège, la hauteur du gonflement peut être notablement augmentée. Il est à remarquer que, plus le renflement est large par rapport à la section de son orifice inférieur, moins la percussion est brusque, parce que pour une tranche donnée dans le renflement le produit de la masse de

cette tranche par le carré de sa vitesse moyenne est moindre. Or, à partir de l'instant où le tube mobile atteint son siège, il faut pour chacune de ces tranches qu'il sorte du tuyau de conduite une quantité d'eau égale à ce qu'elle en contient. On voit déjà d'après cela qu'il y a certains avantages quand on veut augmenter la hauteur du versement, à disposer un renflement au dessus du siège du tube mobile, quoique sans un renflement de ce genre il ne se soit jamais produit aucun coup de bélier sensible, même dans mes expériences faites sur une fort grande échelle avec des tubes très peu résistants. Cela n'est pas étonnant parce que les sections transversales ne peuvent être bouchées par aucun corps solide.

Mais il y a une autre raison pour employer cette disposition dans ce cas. Lorsque l'eau a fini son mouvement ascensionnel, il est convenable que l'oscillation descendante ne vide point trop bas le tube mobile, afin qu'il n'y ait pas de *reniflement* quand il se relèvera. Dans l'expérience dont il s'agit, les proportions de ce renflement n'avaient été déterminées que d'une manière très provisoire dans une localité où il n'était pas d'ailleurs possible de varier beaucoup les études. Il est donc bien entendu qu'il ne s'agit ici que de donner une idée générale de la marche des résultats. La pièce centrale fixe, assez sensiblement cylindrique de 0,165 de diamètre se terminait inférieurement par un cône d'environ $0^{m},25$ de côté. Cette pointe, autant que je peux m'en souvenir, entrait dans le sommet du renflement.

On peut demander pourquoi, à partir de l'instant où le tube atteint son siège il ne faut que 2 1/2 secondes pour l'ascension et le versement, tandis que le tube reste pendant 6 secondes sur son siège. On remarquera d'abord que l'ascension s'est faite quand il y avait déjà beaucoup de vitesse acquise en vertu de la descente de l'eau motrice au bief d'aval. S'il faut tenir compte de la quantité de force vive qui peut avoir été développée en vertu de la course du liquide, dans le renflement au dessous du niveau d'amont, il faut tenir compte

aussi de ce qu'une partie du renflement était déjà occupée à l'instant où le tube a achevé de descendre. Enfin les vitesses ont été assez grandes dans l'espace graduellement resserré par la pièce centrale fixe et la hauteur de versement au-dessus du niveau d'amont étant le triple de la hauteur de chute, la quantité d'eau élevée a été nécessairement beaucoup moindre pour un rendement donné, que si elle s'était versée au-dessus du niveau d'amont à une hauteur analogue à celle de la chute.

Quant à l'oscillation descendante, elle a eu à vider à une profondeur convenable, le renflement dans lequel la surface de l'eau, à partir du moment où elle y était descendue n'avait plus que des vitesses relativement très diminuées. Une remarque semblable doit être faite quant aux expériences précitées sur le grand modèle de Chaillot où la durée de l'ascension avant le versement supérieur était beaucoup moindre dans certaines conditions que celle de l'oscillation en retour.

Chaque fois qu'on faisait une expérience on constatait quel était le nombre de pouces d'eau fournis par l'aqueduc. Mesurant ensuite le temps nécessaire pour remplir un bassin de jauge au moyen de l'eau sortie au sommet de l'appareil on avait le rendement qui a toujours dépassé 40 pour 100 en eau élevée. Le nombre de pouces d'eau fournis par l'aqueduc a varié pendant la durée des expériences de 46 à 53. Il était souvent de 50.

Dans ces limites, je ne me suis pas aperçu que le rendement ait assez changé pour que ses variations ne puissent pas être attribuées à des erreurs d'observations.

Il aurait d'ailleurs fallu pouvoir tenir compte de ce que le tampon précité ne gardait pas bien l'eau et en perdait une quantité qui paraissait être au moins de deux pouces d'eau. L'appréciation de cette perte n'était pas d'ailleurs indispensable parce qu'en la négligeant on était sûr d'avoir un rendement inférieur au véritable puisque l'eau échappée ainsi ne

passait point dans l'appareil. Si donc on avait tenu compte de cette perte, le rendement aurait été plus considérable que je ne viens de le dire. Mais il s'agissait seulement encore d'expériences provisoires indiquant un minimum. L'orifice alternativement découvert par la levée du tube avait seulement 0m,20 de diamètre parce que je me servais des matériaux déjà existants et des tuyaux de fonte mis à ma disposition qui ne purent d'ailleurs, à cause des besoins du service, m'être laissés assez longtemps pour bien achever ces études. Il aurait mieux valu, à certains égards, que cet orifice eût au minimum le même diamètre intérieur que le tuyau de conduite. Je reviendrai plus loin sur ce genre de détails. Mais il est intéressant de conserver la trace des résultats obtenus avec un appareil construit aussi grossièrement, élevant l'eau déjà assez haut par rapport à la chute motrice. D'ailleurs la garniture du siège était en cuir. Une rondelle en caoutchouc aurait mieux gardé l'eau.

On a varié les hauteurs de levée du tube mobile de 0m,08 à 0m,13. Autant que je peux m'en souvenir, c'était pour une levée de 0m,13 que le tube restait sur son siège pendant six secondes, mettait deux secondes à se lever, restait tout ouvert pendant six secondes et mettait une seconde à retomber sur son siège. De sorte que la durée totale de la période était de 15 secondes. Il y avait quatre périodes par minute. C'étaient 53 pouces d'eau qui étaient fournis par la machine de Marly pendant cette expérience. Quand le tube arrivait sur son siège l'eau montait et versait au sommet de l'appareil en 2 1/2 secondes environ. Il ne s'agit au reste que de donner des indications sommaires sur ces expériences provisoires.

Je ne pouvais pas plus qu'à Chaillot changer la quantité d'eau motrice. J'ai varié aussi les levées du tube et son contrepoids, je n'ai pas remarqué plus qu'à Chaillot qu'il en résultât une influence bien sérieuse sur le rendement qui paraît dépendre surtout de la quantité d'eau motrice pour une longueur donnée de tuyau de conduite. J'ai d'ailleurs

remarqué que, ce tuyau n'ayant eu d'abord qu'une longueur moitié moindre, le rendement avait été très sensiblement au-dessous de celui que j'ai obtenu quand j'ai doublé cette longueur pour une même quantité d'eau motrice.

La hauteur à laquelle on peut élever l'eau dans de bonnes conditions dépend du rapport de la quantité de travail en frottement dans le tube d'ascension à celui du travail en frottement dans le tuyau de conduite. On aurait pu élever l'eau beaucoup plus haut avec la même chute motrice si la section de sortie au bief inférieur, au lieu d'être moindre que celle du tuyau de conduite avait été au moins aussi grande, d'autant plus que les vitesses de l'eau ascensionnelle tant à sa sortie au sommet qu'à sa rencontre avec les changements de section auraient été modifiées. En général plus on veut élever l'eau à une grande hauteur par rapport à la chute motrice plus il est convenable, dans des limites très-étendues, que le tuyau de conduite soit long.

Dans ce modèle provisoire, deux rondelles en cuir cousues ensemble étaient encastrées sur le siège fixe. Leur surface supérieure n'était pas rigoureusement horizontale, le tube vertical n'était pas très bien guidé. Par cette raison même, il se posait sur son siège en s'y appuyant, à cause de la pression de l'eau contenue dans son intérieur, il s'inclinait légèrement, ce qui ne l'empêchait pas de garder assez bien l'eau. Il en résultait sans doute un inconvénient. Mais cette remarque est intéressante pour montrer à quel point la construction peut être rustique quand on rend le tube vertical en entier mobile, au lieu de ne rendre mobile qu'une vanne cylindrique ou une soupape de Cornwall. On peut d'ailleurs, dans certaines limites, comme dans la fig. 14, pl. VII, ne faire fermer alternativement un tuyau-soupape que par sa partie inférieure, sa partie supérieure étant jointe au tube vertical fixe par un manchon en cuir. Mais en général, pour les diamètres considérables, il est intéressant de signaler la grande simplicité résultant, dans les limites du possible, de ce qu'un tube

mobile peut n'avoir à se poser alternativement que sur un seul siège, les freins hydrauliques permettant d'ailleurs d'amortir la percussion.

Expériences et considérations sur l'influence de la longueur du tuyau de conduite.

Dans les premières expériences que j'avais faites à Saint-Germain-en-Laye sur le modèle qui a été depuis l'objet d'un rapport de M. Combes reproduit ci-dessus, j'avais d'abord mesuré le rendement en le faisant fonctionner à la main. Le tuyau de conduite ayant alors 12 mètres de long le rendement fut de 50 pour 100. Je réduisis ensuite la longueur du tuyau de conduite à 8 mètres et le rendement fut diminué. Enfin, lorsque, dans ces dernières conditions, j'obtins une marche automatique, le rendement fut encore diminué et réduit à environ un tiers du travail dépensé.

Quand je fis cette expérience provisoire sur le rendement j'avais très peu d'eau à ma disposition. J'étais obligé de prendre un niveau moyen dans une grande cuve servant de bief d'amont. Or la variation du niveau d'amont étant considérable par rapport à la chute motrice, j'ai signalé les inconvénients de cette manière d'apprécier le niveau moyen, cela changeait à chaque période la profondeur de l'oscillation en retour. D'ailleurs nous avons vu combien cela était essentiel pour le rendement. Il est donc bien entendu qu'il ne s'agissait dans cette première série d'expériences que de se former une idée de la marche des résultats.

Autant que je peux m'en souvenir, la levée du tube, pour ces trois séries d'expériences, était de $0^m,06$, et l'eau était élevée à $0^m,53$ environ au-dessus du niveau moyen du bief d'amont pour une chute moyenne peu différente.

On voit déjà qu'il faut que le tuyau de conduite soit assez long relativement à la chute motrice. Quand la levée du tube

mobile est assez grande par rapport au diamètre dans les conditions précitées, la force vive perdue pour faire fonctionner le tube est assez notable.

Nous avons vu que les conditions du maximum de rendement seraient faciles à déterminer si l'on n'avait pas à s'occuper des phénomènes de succion ramenant alternativement le tube sur son siège. Nous savons d'ailleurs que, dans des limites très étendues, plus le tuyau de conduite est long, plus la perte de force vive résultant de la vitesse de sortie de l'eau est diminuée, une même quantité d'eau motrice étant débitée à chaque période dont la durée est d'autant plus grande que la longueur du tuyau est plus considérable. Dans ces conditions on pourra lever beaucoup moins le tube mobile. Il semble au premier aperçu qu'il en résultera un étranglement nuisible. Mais l'essentiel, quant à la perte de force vive dont il s'agit, est que la vitesse de sortie ne dépasse pas certaines limites. Or c'est ce qui arrivera si, pour la descente d'une quantité d'eau donnée, les vitesses sont convenablement diminuées dans le tuyau de conduite.

On pourra commencer par calculer pour chaque période, la quantité d'eau motrice d'où résulterait le maximum de rendement si l'on n'avait point à s'occuper des phénomènes provenant de la vitesse de sortie. Mais ces phénomènes contribuent à la perte de force vive résultant de chaque changement de période. Il est donc important d'en atténuer l'influence dans les limites du possible. Or il faut se procurer la force de succion nécessaire à la baisse alternative du tube. Maïs d'après de nombreuses expériences faites pour des levées diverses de tube, toutes choses égales d'ailleurs en général quant aux vitesses, moins celui-ci est levé, plus la force de succion qui tend à le ramener sur son siège est puissante.

Plus on diminuera la course du tube descendant sous l'action d'une force donnée, moins sa descente durera de temps. Il y a donc lieu de penser qu'on aura moins à tenir compte de ce que la veine liquide annulaire étant coupée graduelle-

ment, ces vitesses à la partie inférieure seront une cause de perte de force vive comme cela a été rappelé dans le rapport de M. Combes.

Pour éviter tout malentendu je supposerai d'abord que la perte de travail occasionnée par la manœuvre de va et vient du tube pût être regardée assez sensiblement comme une constante, ainsi que le travail en frottement qu'il faudrait vaincre pour entretenir les oscillations, abstraction faite de toute élévation d'eau. Nous savons que dans cette hypothèse la somme des deux quantités de travail dont je viens de parler devrait être à peu près égale à la somme des deux quantités de travail qui seraient nécessaires pour conserver les vitesses comme s'il n'y avait pas de résistances passives pendant l'écoulement au bief inférieur et pendant le versement au sommet de l'appareil (1).

Mais plus on augmente la longueur du tuyau de conduite, plus on diminue les vitesses pour une quantité d'eau donnée débitée à chaque période, abstration faite des résistances passives. Nous avons vu que dans ce cas la levée du tube mobile et par suite la quantité de travail nécessaire pour le faire fonctionner, sont d'autant plus diminuées que les vitesses de l'eau sont moindres dans le tuyau de conduite. Or la quantité d'eau qui doit descendre à chaque période pour conduire

(1) Il n'est pas sans quelque intérêt de signaler un moyen assez direct de se rendre compte de la quantité de travail qui serait nécessaire pour entretenir les oscillations sans faire élever de l'eau par le sommet du tube mobile.

Il suffit après le versement à ce sommet de laisser retomber librement la colonne liquide en empêchant le tube de se relever. On voit ainsi à quel niveau l'eau remonte ensuite. Au moyen de la perte de hauteur du sommet de la colonne liquide, on se rend compte approximativement de la quantité de travail en résistances passives dont il s'agit, sachant que dans certaines limites elle est à peu près proportionnelle au cube de l'amplitude de l'oscillation. De sorte qu'on peut se rendre compte du travail qui aurait été nécessaire pour conserver les vitesses comme s'il n'y avait pas eu de déchet, la colonne liquide étant supposée remontée au sommet d'où elle était descendue.

A Billancourt, dans des conditions un peu différentes exposées plus loin, à partir de l'instant où le versement avait cessé au sommet, la

au maximum de rendement est d'autant plus grande, d'après ce qui a été dit ci-dessus, que le travail nécessaire pour faire fonctionner le tube est plus considérable. Il en résulte que, dans des limites très étendues, plus le tuyau de conduite est long, moins il faut d'eau motrice à chaque période pour conduire au maximum de rendement.

Ces considérations sont très importantes pour faire comprendre la marche des résultats. Cela suffirait pour expliquer pourquoi avec un tuyau de conduite de 30 mètres environ de long, un appareil fonctionnant d'une manière automatique, a donné comme on le verra plus loin un rendement beaucoup plus considérable, qu'un tuyau de conduite de 12 mètres de long un peu moins large, il est vrai, mais qu'on faisait marcher avec la main. Or nous avons vu que la marche automatique était une cause de déchet dans des conditions analogues.

colonne liquide mettait huit secondes à descendre et à remonter à $0^m,12$ de celui-ci. Je signale cette perte de $0^m,12$ seulement comme un aperçu, exagéré peut-être si, comme je crois m'en souvenir, cette observation n'a été faite qu'à une époque où il y avait une cause accidentelle de déchet indiquée ultérieurement.

La plus grande difficulté pour connaître le travail perdu à chaque changement de période consiste à apprécier celui qui provient de la manière dont le tube mobile descend alternativement en vertu des effets de la succion de l'eau. Si l'on fait marcher à la main un appareil d'assez petites dimensions, la perte de force vive résultant de l'étranglement graduel de la nappe liquide de sortie peut se réduire à très peu de chose. On voit donc la possibilité en mesurant d'abord le rendement avec cette manœuvre de se rendre compte de la perte provenant de l'emploi des phénomènes de succion.

Il ne reste donc plus qu'à apprécier la perte de force vive résultant de la percussion du tube mobile sur son siège ou du travail employé à éviter cette percussion par un frein hydraulique. Or, on peut se former une idée approximative de la vitesse de ce tube. On a ainsi les éléments nécessaires pour appliquer la formule qui conduit au maximum de rendement.

A Saint-Germain-en-Laye la pièce centrale fixe était en bois, je ne retrouve pas le diamètre de sa partie cylindrique qui descendait jusqu'au niveau de l'eau d'aval. Au tuyau de conduite on avait ajouté dans le réservoir d'amont un évasement de $0^m,67$ de long et de $0^m,29$ de diamètre maximum. Il n'y avait pas d'évasement en amont pour divers autres modèles précités ou dont on parlera plus loin.

Oscillations pouvant servir à mettre l'appareil en train malgré l'absence d'un surveillant.

A Saint-Germain-en-Laye le tuyau de conduite débouchait latéralement dans un réservoir en zinc tenant lieu de bief d'amont. Il débouchait latéralement aussi dans le bief supérieur, pour l'appareil objet du rapport précité de M. Combes. Il était convenable que cet orifice ne fût jamais découvert. Son immersion offre divers avantages. La machine peut marcher plus longtemps si le niveau d'amont baisse, puisque la vitesse nécessaire à la succion peut encore finir par être engendrée après un temps suffisant. Il se présente un effet singulier quand la chute motrice est devenue très petite. Chaque période se divise en deux, dont une seule verse de l'eau. Cela diminue la quantité de liquide écoulé à chaque période et peut permettre de marcher plus longtemps, peut-être aussi, laisser à l'eau affluente le temps de se gonfler de nouveau en amont. Il y a même des circonstances où le tuyau vertical ne se relève plus quand le niveau est trop descendu en amont, ce qui est utile pour que l'eau ait le temps de monter dans le bief supérieur (1).

(1) Je m'exprimais ainsi quant à ce détail des expériences faites à Saint-Germain-en-Laye, dans le bulletin de la Société philomathique. Séance du 2 novembre 1850 (journal l'*Institut*).

... « Lorsque le niveau est baissé dans la grande cuve au delà d'une certaine limite la colonne liquide contenue dans le tuyau vertical redescend près du siège de ce dernier qui, en se relevant, introduit dans le système de l'eau du bief inférieur. Or il en résulte des phénomènes analogues à ceux qui proviennent du mouvement de l'eau dans l'autre sens et le tuyau à peine soulevé redescend. L'eau remonte en oscillant quand il est redescendu, et il ne s'ouvre complètement qu'à la seconde oscillation descendante. De sorte qu'il n'y a que la moitié d'un certain nombre de périodes qui versent de l'eau dans le tonneau supérieur. Elles alternent d'ailleurs avec régularité abandonnées à elles-mêmes... »

Lorsque le niveau d'amont est convenablement relevé le moindre ébranlement peut suffire pour mettre la machine en jeu. On entendait d'abord un ronflement au pied du tuyau vertical qui ne gardait jamais l'eau d'une manière parfaite et donnait lieu par conséquent au développement de phénomènes curieux de vibration des veines liquides analogues sans doute à ceux qui sont signalés par F. Savart. A ce ronflement succédaient des oscillations qui commençaient par être très petites; mais devenaient ensuite de plus en plus étendues, et finissaient par être capables de permettre au tuyau vertical de se relever complètement, afin de mettre la machine en train.

Le premier ébranlement paraît pouvoir être occasionné ici par la percussion d'une veine liquide sortant du réservoir d'amont quand il est suffisamment plein.

Le phénomène dont je viens de parler est intéressant pour montrer d'après quels principes on pourra sans doute utiliser l'appareil par *éclusées,* même sans avoir besoin d'un surveillant; il est à peine nécessaire d'ajouter qu'il est toujours facile d'empêcher la machine de marcher en son absence.

Influence des dimensions de la bouche de sortie en aval

La détermination de la grandeur de l'orifice de sortie dépend de deux considérations bien distinctes. Si avec un appareil de dimensions données, on veut pouvoir débiter le plus d'eau possible, il est important que la bouche de sortie ait un diamètre au moins égal à celui du tuyau de conduite. Mais je suppose qu'on soit obligé de ménager beaucoup l'eau motrice et de tenir surtout au rendement, en donnant assez de longueur au tuyau de conduite pour être, sous ce rapport, dans les meilleures conditions. Nous avons vu que dans

ce cas l'orifice resté libre par la levée du tube mobile peut être notablement moindre que la section du tuyau de conduite. Alors on peut rétrécir l'extrémité de ce dernier et celle du tube mobile en augmentant la levée de celui-ci, auquel on pourra donner des sections convenablement réglées par rapport à son orifice inférieur. Comme cette disposition ne serait adoptée que pour le cas d'un tuyau de conduite d'une grande longueur, les sections du tube vertical mobile pourraient ainsi être diminuées sans qu'il en résultât beaucoup d'inconvénient quant au frottement de l'eau dans ce tube. Il est intéressant de présenter ces considérations; mais, en général, on pourra, comme on le verra mieux plus loin, varier les effets selon les quantités d'eau disponibles en choisissant un diamètre de l'orifice de sortie au moins égal à celui du tuyau de conduite, parce qu'on pourra changer les levées du tube mobile.

Je donnerai plus loin le détail des expériences qui confirment ces principes, je rappellerai seulement ici qu'on est parvenu avec le modèle, objet du rapport de M. Combes, à régler le contrepoids de manière à le rendre si peu prépondérant, que le tube mobile, se levant quand on voulait à une hauteur extrêmement petite, l'appareil pouvait cependant marcher régulièrement en ne débitant que des quantités d'eau très-minimes, dont une partie était versée au sommet à chaque période (1).

(1) Pour ce tuyau de conduite de $0^m,20$ de diamètre j'avais constaté à Saint-Germain-en-Laye, avant d'avoir trouvé les phénomènes de succion qui permettent d'obtenir la marche automatique, qu'une levée de $0^m,06$ du tube mobile était suffisante dans les conditions où l'appareil était alors, quoiqu'il ne fût pas sans quelque utilité d'avoir une levée plus grande. Lorsque ce tube se lève plus que cela n'est indispensable, il se présente un effet intéressant pour la marche automatique. Ainsi quand le même appareil a été installé chez le maraîcher de Versailles, le tube mobile, au lieu de se lever seulement à la hauteur indiquée dans le rapport de M. Combes, a pu se lever à une hauteur de $0^m,08$, le contrepoids étant diminué de manière à ne pas changer la durée de chaque période, qui élevait un peu plus d'eau. On

Quand on élargit la bouche d'aval du tuyau de conduite, si l'on veut ne pas changer la quantité d'eau débitée à chaque période on est obligé de diminuer la levée du tube mobile. De sorte qu'il n'y a pas d'avantage, dans ces conditions à évaser cette extrémité. On conçoit même qu'il pourrait en résulter, dans la nappe liquide des complications de mouvements qui seraient une cause d'augmentation des résistances

entendait encore moins le bruit de ce tube quand il retombait sur son siège. Mais le jeu de l'appareil était en apparence plus indécis. Sans paraître en général bien importante, une levée assez grande du tube mobile est intéressante à étudier étant combinée avec le contrepoids. Mais la réussite des freins hydrauliques nouveaux à l'écluse de l'Aubois change complètement l'état de la question, quant à l'emploi des grands appareils.

Voici un extrait du procès-verbal de la séance de la Société Philomathique du 22 novembre 1850 (journal *l'Institut*) relatif à quelques détails des premières expériences faites à Saint-Germain-en-Laye sur les effets de la succion à contre-courant.

« J'ai prolongé extérieurement, au moyen d'une couronne de fort zinc horizontale, le plan inférieur de l'anneau disposé au bas du tuyau vertical mobile, de sorte que le diamètre extérieur s'est trouvé d'environ $0^m,50$. L'appareil avec cette addition fonctionnait encore, mais la force de succion qui faisait alternativement appliquer ce tuyau sur son siège était sensiblement diminuée. Cette force de succion était encore sensiblement diminuée quand le diamètre extérieur a été réduit à $0^m,39$ environ, mais il n'y avait plus de diminution quand ce diamètre a été successivement réduit à $0^m,35$ et à $0^m,32$. Enfin, pour ce dernier diamètre, j'ai augmenté considérablement la force de succion en relevant extérieurement les bords de la couronne, ce qui a été facile en y faisant des entailles dans le sens des rayons. Non seulement le tuyau en redescendant enlevait un contre-poids beaucoup plus fort, mais l'appareil s'est mis à fonctionner avec une telle violence que le tuyau rebondissant alternativement avec rapidité contre son siège et son arrêt supérieur, ne versait plus d'eau à son sommet et il pouvait être considéré comme un nouveau moyen de donner des coups de marteau ou de pilon. Il a fallu relever l'arrêt supérieur.

« Cette disposition de la couronne extérieure a permis aussi d'augmenter la distance à laquelle se faisait la succion. Ainsi le tuyau étant en équilibre avec son contrepoids restait immobile à $0^m,22$ de hauteur au-dessus de son siège, quand cette couronne n'existait pas. Or, il était attiré par cette succion à une distance d'au moins $0^m,26$, *même en en-*

passives. Il y aurait d'ailleurs une limite au delà de laquelle on pourrait craindre qu'il n'en résultât des trépidations, si l'on ne prenait pas de précaution pour les éviter.

A l'époque de mes premiers essais j'avais notablement élargi une bouche de sortie et son tube mobile. J'avais disposé en amont un grillage à trop petites mailles qui, n'étant pas assez près du niveau du bief supérieur, fut en grande partie bouché par la vase. Il en résulta un effet singulier facile à comprendre d'après ce que je viens de dire. Le tube mobile eut un mouvement de trépidation, et il fut impossible, dans ces conditions, de lui faire élever de l'eau. On voit combien il est essentiel, quand il y a beaucoup de vase, de prendre des précautions pour qu'un grillage ne soit jamais engorgé. Il s'agit d'ailleurs surtout d'empêcher d'entrer dans l'appareil des corps d'un certain volume, car il jouit en général de l'avantage de se débarrasser facilement des autres, du moins

traînant un contrepoids plus pesant que lui, quand cette couronne extérieurement relevée était disposée comme je l'ai dit. Lorsque les bords de cette couronne étaient au contraire courbés de haut en bas, l'appareil s'arrêtait, même pour des levées très petites du tuyau mobile.....
« J'ai aussi constaté que l'on pouvait augmenter les effets apparents de cette succion, en faisant alternativement plonger dans l'eau une partie du contrepoids. Il est clair, en effet, qu'il résulte de cette immersion alternative, qu'au commencement de la succion, la partie du contrepoids qui doit alternativement soulever le tuyau ne l'empêche pas de commencer à descendre. On peut obtenir un effet analogue au moyen d'un ressort... »

Dans la séance du 28 décembre 1850 j'ai ajouté quelques détails sur les effets d'un plan horizontal formé assez grossièrement d'une simple maçonnerie en pierres sèches à la hauteur du siège du tuyau fixe. Je rappellerai seulement ici que ce plan a permis au tube mobile de redescendre sur son siège en entraînant un poids dépassant de 5 1/2 kilogrammes celui qui le tenait en équilibre, quand il était un peu soulevé et en quelque sorte flottant dans l'eau du bief inférieur avant l'addition de ce plan fixe. Ce poids était d'ailleurs suspendu à un bras de levier notablement plus long que celui auquel le tube était attaché à l'autre extrémité du balancier. Ce détail n'est peut-être pas sans quelque intérêt pour mieux fixer les idées sur la nature des phénomènes.

lorsqu'on tient le tube mobile levé au besoin pendant le temps nécessaire.

Quant à l'évasement de l'extrémité d'aval, il est utile, comme on le verra mieux plus loin, pour les cas où l'on est obligé de débiter de grandes quantités d'eau. Il y a d'ailleurs lieu d'examiner si l'on ne pourrait pas, sans trop de dépense, donner à tout le tuyau de conduite le diamètre de la bouche de sortie, de manière à diminuer les frottements. Il faut au reste tenir compte des difficultés pouvant provenir, au delà de certaines limites dans les diamètres, du jeu des grands tubes mobiles. Il est vrai que la réussite des freins hydrauliques appliqués à l'écluse de l'Aubois change complètement l'état de toutes ces questions.

Dans diverses expériences sur un appareil dont le tuyau de conduite et la bouche de sortie avaient $0^m,25$ de diamètre on a obtenu de bons résultats, comme on le verra plus loin, en réduisant la levée du tube mobile à $0^m,015$. On voit d'après cela que, dans certaines conditions, il serait inutile d'élargir la bouche de sortie, qu'il vaudrait même sans doute mieux la rétrécir comme dans les expériences précitées faites au réservoir de Picardie, en diminuant l'étendue des surfaces qui doivent garder l'eau, ce qui simplifie l'exécution. Cependant, quand on veut élever l'eau assez haut par rapport à la chute motrice, il est utile de ne pas rétrécir cet orifice et même de l'élargir au moyen d'un évasement graduel. En effet nous avons vu qu'il était alors convenable de disposer au-dessus de cet orifice un renflement d'un diamètre plus grand que celui du tuyau de conduite. Or on n'a pas en général beaucoup de place entre cet orifice et le niveau du bief supérieur pour faire un évasement qui ne soit pas brusque. Il est donc intéressant de trouver déjà un élargissement facilitant l'emploi d'un renflement sans changement trop brusque de sections. Il est d'ailleurs utile, quand le niveau d'amont tend à monter de manière à arrêter l'appareil en s'opposant aux oscillations en retour si l'on ne change pas le contrepoids, de pouvoir aug-

menter considérablement le débit, afin d'éviter de perdre de l'eau par un trop-plein. On conçoit que, dans cette circonstance, il est convenable de pouvoir augmenter beaucoup la levée du tube mobile.

Si le tuyau était trop large par rapport à la chute motrice, il y aurait évidemment une limite assez restreinte au delà de laquelle il serait plus avantageux d'augmenter la section de la pièce centrale fixe que d'exagérer l'élargissement au-dessous du niveau d'amont pour obtenir une élévation plus grande avec une oscillation en retour faite dans de bonnes conditions.

Influence de la bouche de sortie au sommet du tube mobile

Ainsi que cela est indiqué dans le rapport de M. Combes, cet appareil est au fond la même chose que mon système d'écluses de navigation sur lequel une série d'expériences provisoires avait été faite près de Saint-Lô pour le cas seulement où l'on vidait le sas en relevant une partie de l'eau au bief d'amont. Le tuyau de conduite était en zinc d'environ $0^m,002$ d'épaisseur, ce qu'il est intéressant de rappeler pour montrer que ces grandes colonnes liquides ont fonctionné régulièrement dans des parois aussi fragiles sans les endommager. Un rapport favorable fut rédigé par M. Méquet, inspecteur général des ponts et chaussées, dans lequel il dit : « La commission regarde l'essai du Rocreul comme complè-
« tement concluant en ce qui concerne l'application pratique
« de la machine oscillante de M. de Caligny, à de petites
« chutes et à des élévations moyennes; elle a été singulière-
« ment frappée de la simplicité de l'appareil et de ce qu'il
« présente d'ingénieux... »

J'avais d'abord disposé un cylindre central fixe comme dans les appareils précités. Mais je reconnus qu'à ce point de

vue les conditions étaient très différentes. En effet, c'est surtout pour le cas où l'on veut élever de l'eau à une hauteur assez notable relativement à la chute motrice, que la présence de cette pièce est utile. Elle permet de rétrécir la section sans diminuer le diamètre du tube mobile. Il est à remarquer que l'eau élevée sortant par l'espace annulaire resté libre autour de cette pièce, l'orifice d'évacuation au sommet est dans de bonnes conditions pour le cas d'une élévation assez grande. De sorte que la quantité d'eau élevée à chaque période étant petite par rapport au volume dépensé pour une chute motrice bien moindre que la hauteur d'élévation il n'y a pas à se préoccuper beaucoup, en général, de la force vive perdue par le jaillissement au sommet de la machine, qu'on peut même se dispenser d'évaser.

Mais le cas est très différent pour l'écluse de navigation précitée. Les premières périodes ne relèvent l'eau au-dessus du niveau dans l'écluse qu'à une hauteur petite relativement à celle de ce niveau au-dessus du bief d'aval. C'est seulement pour les dernières périodes beaucoup moins importantes que les premières, qu'on pourrait avoir à tenir compte d'une considération contraire. De sorte qu'au lieu de rétrécir la section au sommet du tube mobile il a mieux valu l'élargir.

Pour les écluses de navigation on est obligé de débiter de grandes masses d'eau dans un temps très-court. Les conditions à remplir sont donc bien différentes de celles d'une machine ordinaire à élever de l'eau.

Mais on peut donner une si grande section au tuyau de conduite, même relativement à la chute, que cela change complètement l'état de la question. On conçoit d'après cela pourquoi on a obtenu un bon rendement en débitant de très grandes quantités d'eau, tandis que c'est seulement pour des volumes d'eau motrice beaucoup moindres qu'on obtient un rendement aussi fort dans les conditions précitées.

J'ai cru devoir dire quelques mots des expériences provisoires faites près de Saint-Lô, en 1851, sur une écluse de pe-

tite navigation, et de très faibles chutes dans une localité où l'on n'en avait aucun besoin et où l'on se contenta par économie d'employer des tuyaux en zinc parce qu'ils n'étaient pas destinés à avoir une longue durée. Les expériences faites à l'écluse de l'Aubois et même celles qui ont été faites à Chaillot sur un modèle d'écluse, en 1865, sont bien autrement importantes. Mais il est intéressant de rappeler qu'on avait obtenu un rendement satisfaisant dans de mauvaises conditions avec des tuyaux ayant des parois aussi fragiles et une aussi petite longueur développée. On avait, il est vrai, augmenté le nombre des périodes, ce qui était une cause de perte de temps.

Après avoir ajouté ces quelques mots à ce que j'ai dit au commencement de la seconde partie de cet ouvrage sur les écluses de navigation, je vais revenir d'une manière plus spéciale sur le système objet de ce chapitre.

Expériences faites pendant l'exposition universelle de 1855

Le jury international de l'exposition universelle de 1855 a fait faire des expériences sur un modèle de cette machine au Conservatoire des Arts et Métiers. Le tuyau de conduite en zinc de $0^m,25$ de diamètre intérieur avait une longueur développée d'environ $28^m,50$. L'orifice de sortie avait aussi $0^m,25$ de diamètre, tandis qu'à Versailles, il n'avait que $0^m,20$; il y avait sur le siège fixe une rondelle en caoutchouc. Le tube vertical mobile avait $1^m,80$ de haut et $0^m,32$ de diamètre intérieur. Le cylindre central fixe était d'environ $0^m,27$ de diamètre extérieur. Mais il se terminait inférieurement par un cône portant une tige qui venait s'emboîter dans une traverse posée à l'entrée du tuyau fixe. Je reviendrai plus loin sur ce détail. Le tube mobile avait autour de son anneau inférieur de $0^m,03$ de largeur une collerette relevée en forme de

parapluie-renversé percé par le milieu, elle dépassait cet anneau de $0^m,18$ environ sur toute la circonférence. La hauteur dont la collerette se relevait au-dessus de l'anneau sur lequel était soudé le tube mobile était d'environ $0^m,08$. Cette pièce était renforcée par un bout de tuyau conique de $0^m,13$ de génératrice, qui, étant soudé d'un côté sur la collerette à $0^m,11$ de l'anneau inférieur et de l'autre sur le tube mobile, formait un flotteur. Mais cela n'aurait pas été suffisant pour faire relever le tube en temps utile, s'il n'y avait pas eu un balancier à contrepoids.

Le tuyau de conduite, étant posé dans une localité où se faisaient beaucoup d'autres expériences, avait été endommagé à plusieurs places, mais d'une manière assez régulière pour qu'on ait pu se rendre compte de l'influence des pertes d'eau qui en résultaient. Dans les expériences officielles on a mesuré le rendement sans tenir compte de ces pertes, se montrant satisfait d'un minimum de 43 pour 100 en eau élevée. Je recommençai ensuite cette expérience avec deux ingénieurs en chef des ponts et chaussées. MM. Andral et Courbebaisse, qui étaient eux-mêmes exposants. Le premier avait la bonté d'observer le niveau d'amont, le second observait les mouvements du tuyau mobile et comptait le nombre des périodes qui fut de 60 en 10 minutes.

Le rendement, mesuré de la même manière, était sensiblement le même que celui qui avait été signalé dans les expériences officielles, il est intéressant de le discuter au moyen de divers détails, on n'eut pas d'ailleurs le temps de faire des études sur la manière dont le rendement pouvait être modifié par les quantités d'eau motrice et par différentes manœuvres.

La chute motrice moyenne, en tenant compte des variations du niveau dans le bief d'amont et sans tenir compte d'abord des exhaussements alternatifs dans celui d'aval, était de $0^m,515$, et la hauteur du versement au-dessus du niveau moyen du bief d'amont était de $0^m,875$. L'appareil débitait 4 mètres cubes d'eau en dix minutes. La quantité tombée au

bief d'aval était à très peu de chose près le quadruple de celle qui était élevée. Chaque période durant dix secondes, le tuyau restait sur son siège un peu plus de quatre secondes. Il montait en un peu plus de deux secondes, descendait en un peu moins de deux secondes et restait pendant deux secondes entièrement levé. Il était intéressant surtout de connaître quelle était, pendant ce temps, la quantité d'eau inutilement descendue au bief d'aval par les fissures. J'ai arrêté complètement l'appareil, et, pendant six minutes, la quantité d'eau perdue a été d'un peu plus du quart de celle qui serait descendue au bief inférieur si la machine avait marché le même temps.

Pendant que le tuyau est sur son siège, la machine étant en train, les pressions ne sont pas constantes sur les fissures. A l'instant où le tube descend, elles sont moindres, en général, que si le liquide était en repos stable. Mais ensuite elles augmentent et finissent par être plus grande sur celles qui sont le plus près du tube d'ascension. Quand l'oscillation redescend, les pressions ne sont pas non plus constantes. Au commencement de la descente, elles sont plus grandes que si la colonne liquide était en repos stable. Il faut d'ailleurs tenir compte de ce que la durée de la partie de l'oscillation, qui finit lorsque le niveau se trouve dans la portion qui, au-dessous du niveau d'amont, est élargie parce que la pièce fixe se termine en cône, est plus grande qu'elle ne le serait si la section libre était constante dans le tube vertical. Comme il ne s'agit que de se former une idée approximative du résultat de ces pertes d'eau pendant que le tuyau est sur son siège, on peut conclure, qu'elles sont d'environ un dixième de l'eau qui descend à chaque période.

Il faudrait pouvoir apprécier les résistances résultant des déformations du tuyau de conduite, surtout les pertes d'eau provenant des fissures précitées quand le tube mobile est levé. A cette époque, les pressions sont loin d'être les mêmes sur ces diverses fissures, qui étaient au reste assez

régulièrement espacées. Il est clair que, près du tube mobile elles sont très faibles, tandis qu'il n'en est pas ainsi près du réservoir d'amont. La durée de cette époque étant d'ailleurs beaucoup plus longue que celle pendant laquelle le tube repose sur son siège, il ne paraît pas que ces pertes soient assez petites par rapport à celles qui se font pendant que le tube est baissé, pour empêcher de conclure que le rendement devait être en nombres ronds d'environ 50 pour 100. On peut supposer même quelque exagération dans la mesure des quantités d'eau perdue et ne pas tenir compte d'un détail précité sur la manière d'apprécier les effets des variations régulières des niveaux, qui étaient de $0^m,06$ en amont et de $0^m,03$ en aval. Si l'on y avait égard, cela réduirait la chute moyenne (prise d'abord sans tenir compte du gonflement en aval) à environ $0^m,50$ et porterait l'élévation à environ $0^m,90$ en nombres ronds d'après ce qui a été dit ci-dessus de la manière dont le versement se fait précisément à l'époque où le niveau d'amont est descendu le plus bas. Mais, en négligeant ces détails, je ne comptais pas sur un rendement de plus de 50 pour 100, dans ces conditions, pour la quantité d'eau motrice employée. D'ailleurs, quant au gonflement en aval, il aurait été insignifiant si le bief inférieur avait été assez large, comme il l'est ordinairement pour les machines hydrauliques, au lieu d'être représenté comme il l'était par un réservoir d'une petite section sur les bords extérieurs duquel le gonflement alternatif était observé.

On a essayé de retrancher la moitié de la longueur du tuyau de conduite en débitant d'ailleurs plus d'eau, mais le rendement a été très sensiblement diminué. Longtemps après à l'exposition universelle de 1867, on n'eut pas la quantité d'eau motrice sur laquelle on avait compté, et l'on trouva une augmentation de rendement considérable En appliquant la théorie exposée ci-dessus, j'ai donné les raisons de cette augmentation de rendement.

La médaille de première classe me fut décernée en 1855

pour cet appareil. On lit dans le rapport rédigé par M. le général Morin : « M. de Caligny (n°911)... a exposé un appareil « hydraulique du genre des béliers, *mais dans lequel il ne se pro-« duit pas de choc apparent*, et dont la construction simple et peu « dispendieuse permet de l'appliquer aux besoins de l'agri-« culture. Des expériences faites au Conservatoire des Arts « et Métiers, ont constaté que cet appareil donnait un rende-« ment de 43 pour 100 du travail du moteur dépensé... »

On a remarqué que c'est à une époque où l'on croyait encore à un rendement si peu considérable que l'auteur de ce rapport a signalé cet appareil dans son Traité des machines et appareils destinés à l'élévation des eaux, à cause des services que, par son extrême simplicité, il paraît destiné à rendre à l'agriculture. J'avais prescrit, ainsi que cela est d'ailleurs rappelé dans le rapport de M. Combes, de disposer les dimensions de la pièce centrale fixe de manière que l'oscillation ne descendît pas au-dessous du niveau de l'eau du bief inférieur. On a pu croire, d'après le modèle de 1855, que je n'avais pas conservé cette disposition. Cependant, la partie conique par laquelle cette pièce fixe se termine inférieurement était assez longue pour avoir égard à cette condition relativement à la chute et à l'élévation données, quoique les proportions n'eussent pas été étudiées assez rigoureusement peut-être (1).

(1) J'ai toujours prescrit relativement à ce genre de machines de disposer le cylindre central fixe de manière que l'oscillation en retour descende à peu près jusqu'au niveau du bief d'aval sans aller au-dessous. Quand on veut élever l'eau au-dessus du bief d'amont à une hauteur beaucoup plus grande que celle de la chute il est convenable que cette pièce ne se prolonge pas trop au-dessous du niveau de ce bief. Il est même utile d'élargir dans certaines limites, comme je l'ai expliqué pour les expériences du réservoir de Picardie, la partie du tube mobile qui est au-dessous de ce même niveau. Mais il est bon d'avoir égard, d'après ce qui est expliqué dans la première partie, à ce qu'il est intéressant de diminuer le chemin des résistances passives dans le tuyau de conduite quand la colonne liquide approche de ce niveau. On conçoit, d'après cela, que la pointe par laquelle le

Les phénomèmes de succion qui font retomber le tube sur son siège, ont été contesté, pour le cas où le tube fonctionnerait en entier au-dessus du niveau d'aval. Ils sont moins puissants, que si l'extrémité inférieure du tube était convenablement plongée. Mais j'ai fait constater officiellement leur

cylindre fixe est inférieurement terminée doit pouvoir pénétrer convenablement au-dessous de ce même niveau.

Lorsque la hauteur de versement est moindre relativement à la chute motrice, le cas est très différent. Quand même cette élévation ne serait pas plus grande que la chute il serait utile dans certaines limites de rétrécir par une pièce fixe la section du tube mobile pour diminuer, comme je l'ai expliqué, le chemin des résistances passives lorsque le tube repose sur son siège. Mais alors la disposition de la partie conique inférieure dépend de principes différents. Si ce cône était trop allongé, l'oscillation en retour ne redescendrait pas jusqu'au niveau d'aval.

Dans le modèle qui a fonctionné au Conservatoire des Arts et Métiers, la disposition de ce cône avait pour but de faire en sorte que le niveau d'aval fût à peu près atteint par l'oscillation en retour, quoique la hauteur du versement au-dessus du niveau d'amont fût notablement plus grande que la chute motrice. Cette pièce centrale fixe a été malheureusement perdue, de sorte que je ne peux constater si ses dimensions étaient celles qui devaient conduire au maximum de rendement. Autant que je peux m'en souvenir la partie cylindrique avait environ $0^m,27$ de diamètre et la partie conique avait une hauteur moindre que la moitié de la hauteur totale du tube mobile, de sorte que toute la partie de celui-ci qui était au-dessus du niveau d'amont avait sa section réduite par la partie cylindrique.

Il est d'ailleurs intéressant de signaler un moyen pratique très simple de s'assurer si l'oscillation en retour se fait dans de bonnes conditions. Il suffit de percer un très petit orifice près du niveau du bief d'aval. Cela permet de voir si l'oscillation en retour descend jusqu'à la profondeur convenable. Je regrette de ne pas avoir pensé à ce détail, surtout à l'époque où furent faites les expériences en grand aux anciens bassins de Chaillot.

Il est au reste à remarquer que ce modèle était bien rustique, ce qui n'est pas sans quelque intérêt pour les applications de cette machine à l'agriculture. En effet, il faut toujours compter dans la pratique sur des diminutions de rendement provenant de la détérioration des appareils. Or, quand la construction aura été faite avec un soin convenable on aura, en général, des machines dans de meilleures conditions que le modèle dont il s'agit.

existence qui se manifeste d'ailleurs même dans le petit modèle en verre qui est au Conservatoire des Arts et Métiers.

Quant au passage du rapport relatif à la variation des niveaux en amont et au *trop-plein* par conséquent, M. le général Morin m'a autorisé à publier une lettre qu'il m'a fait l'honneur de m'écrire, le 5 février 1859, et dans laquelle il dit : « Vos souvenirs à l'égard des expériences faites au « Conservatoire impérial des Arts et Métiers, en 1855, sont « parfaitement exacts ; le niveau pouvait s'abaisser dans le « bassin alimentaire de votre machine sans en interrompre le « jeu, mais il ne pouvait s'élever au delà d'une certaine limite « sans faire cesser complètement la marche de l'appareil ; « cet inconvénient se serait, sans aucun doute, moins facile- « ment manifesté, si, comme on devrait le faire dans une ins- « tallation définitive, la section du bassin alimentaire avait « été plus grande. »

Au lieu de perdre de l'eau par un *trop-plein*, il vaut mieux, quand l'eau du bief d'amont tend à s'élever, de manière que l'oscillation en retour ne puisse plus se produire dans de bonnes conditions, faire débiter assez d'eau à l'appareil pour empêcher le niveau supérieur de s'exhausser autant. S'il en résulte qu'on ne soit plus alors dans les conditions qui conduisent au maximum de rendement, on tirera toujours un certain parti de l'eau qui sera passée dans le système. Il suffit pour cela, dans des limites assez étendues, de combiner le tube mobile avec un flotteur qui sera atteint en vertu de l'exhaussement du bief d'amont. Il faudra un débit beaucoup plus considérable pour développer une force de succion capable de ramener le tube sur son siège, quand même sa levée ne serait pas augmentée, parce qu'il faudra entraîner le flotteur.

On conçoit donc que, dans les limites de la quantité d'eau qui pourra passer par l'appareil, il sera possible d'empêcher le niveau d'amont de s'élever assez haut pour s'opposer à une oscillation en retour faite dans de bonnes conditions.

Expériences faites par le Jury international de l'Exposition universelle de 1867.

Dans les expériences faites en 1867, à l'île de Billancourt, le nombre des périodes de l'appareil était pour diverses expériences de 11 en 2 minutes. La quantité d'eau fournie par des pompes à la machine était par minute dans diverses expériences à celle qui entrait dans une caisse servant de bief d'amont en 1855, au Conservatoire des Arts et Métiers, à peu près comme 275 est à 400, quoiqu'on eût un peu augmenté la hauteur du tube mobile et de la pièce centrale fixe afin d'avoir une chute et une hauteur d'élévation plus grandes. La levée du tube mobile était réduite de manière à être tout au plus de $0^m,04$ à $0^m,05$ souvent même bien moindre. Il y avait une cause de déchet assez notable, abstraction faite des défauts de construction de la machine. Le mouvement des pompes qui alimentaient le bief supérieur n'était pas assez régulier pour que le niveau de celui-ci ne changeât que dans des limites très restreintes. On pouvait se rendre compte de la quantité d'eau arrivée dans ce bief au moyen du nombre de coups de piston des pompes, mais cela était au désavantage de la machine quand on ne tenait pas compte de leur déchet.

Connaissant le niveau au commencement et à la fin de chaque expérience, on pouvait déterminer la quantité d'eau qui était réellement passée dans l'appareil. Mais les variations de niveaux dont il s'agit changeaient les conditions de l'oscillation en retour. On a vu ci-dessus comment le degré de profondeur de cette oscillation influe sur le rendement. D'après ces diverses considérations j'attache une certaine importance à trois séries d'expériences mentionnées d'ailleurs dans le Rapport du Jury, quoique, l'une n'ait eu que quatre périodes et chacune des deux autres seulement trois périodes.

Pour la première au moins, il est vrai, il fallait lever le tube à la main. Cependant le rendement de 0,70 environ semble pouvoir être adopté comme une limite supérieure de ce que l'appareil pouvait donner pour cette installation rustique, d'autant plus que toute l'eau sortait du réservoir d'amont sans y être alors entretenue par les pompes. Cela changeait les conditions de l'oscillation en retour à chaque période et à la rigueur il serait juste de tenir compte de la diminution de rendement qui en résultait. La moyenne du rendement serait, d'après le tableau des expériences publié dans le Rapport du Jury, d'environ 60 pour 100; il dépasserait un peu ce chiffre si l'on rejetait la première expérience évidemment défectueuse, il serait un peu moindre si l'on en tenait compte. Quoi qu'il en soit il était intéressant de signaler le résultat dont je viens de parler à cause du mode d'observation employé à déterminer cette limite.

A Billancourt, la longueur du tuyau de conduite était de $30^{m},70$ plus la longueur développée d'un coude en quart de cercle dont le rayon moyen de courbure était d'environ $0^{m},60$.

A la fin de l'Exposition il se présenta un effet singulier qui a une certaine importance pour montrer à quel point l'appareil peut être considéré comme *rustique*. On avait négligé d'y mettre un grillage. Un rouleau de toile goudronnée appelée bâche avait été mis par mégarde dans la grande cuve servant de bief d'amont. Sans doute pendant que la machine fonctionnait, cette bâche entra dans le tuyau de conduite. Cela n'empêcha point l'appareil de marcher régulièrement. Mais le rendement était diminué sans qu'on pût se rendre compte de cette cause de déchet dont on ne s'est aperçu qu'en démontant la machine.

Il n'est peut-être pas sans quelque intérêt de rappeler que la rondelle en caoutchouc formant alternativement joint entre le tube fixe et le tube mobile n'était pas clouée. Il n'était même pas nécessaire pour les dimensions déjà cepen-

dant assez grandes de cet appareil que cette rondelle fût encastrée. Elle montait et descendait librement le long des guides entre le tube mobile et son siège fixe.

Expériences faites en 1872 et 1873 au Jardin de l'Orangerie de Versailles.

J'ai recommencé une nouvelle série d'études sur le même modèle dans des conditions un peu différentes, au jardin de l'Orangerie de Versailles. L'eau motrice était reçue dans la grande cuve en zinc d'environ $0^{m},80$ de haut et $3^{mc},05$ de section qui avait servi de bief d'amont pour les expériences précitées de 1867. Avant de commencer chacune de celles-ci, on jaugeait la quantité d'eau fournie par un robinet alimentaire. Chaque expérience durait au moins 5 minutes. Connaissant le volume d'eau arrivé pendant ce temps, et mesurant dans un bassin de jauge l'eau élevée, il était facile d'obtenir le rendement en multipliant ce dernier volume par la hauteur de l'élévation au-dessus du niveau d'amont, et multipliant par la hauteur de chute la quantité d'eau tombée au bief d'aval. Deux séries d'expériences furent faites en 1872 et 1873. M. de Lagrené, ingénieur en chef des ponts et chaussées, fut chargé par M. le ministre des travaux publics de rendre compte des résultats. En 1872, j'avais relevé complètement le rebord en zinc qui dépassait le flotteur disposé à l'extrémité inférieure du tube mobile, cela diminua beaucoup la résistance de l'eau à la descente du flotteur. Mais il en résulta un inconvénient singulier qui ne s'était présenté, ni dans les expériences de 1855, ni dans celles de 1867. Le tube mobile rebondissait beaucoup plus sur son siège en caoutchouc, et cela occasionnait des irrégularités dont il semblait d'abord difficile de se rendre compte. Si le rendement s'élevait quelquefois à 0,67, il descendait quelquefois au-dessous de 0,50. Voulant approfondir la cause de ces anomalies, je re-

commençai une autre série d'expériences en 1873, et alors je rétablis le rebord extérieur en zinc, tel qu'il était en 1867, il dépassa le flotteur de 0m,07 au lieu de lui faire une sorte de *poupe*. Cela changea complètement l'état de la question. Le tube mobile rebondissait encore, mais la résistance du rebord précité toujours plongé dans l'eau atténuait beaucoup cet inconvénient. Il y a eu encore des variations dans le rendement ; mais elles étaient bien moindres que l'année précédente et il ne descendit pas au-dessous de 0,58.

Le débit d'alimentation fut réglé de manière à être à peu près égal à celui de la machine. De sorte que la hauteur de chute et celle d'élévation n'ont éprouvé que des variations peu importantes pendant les expériences : la hauteur du niveau en amont variait de 0m,04 celle du niveau en aval variait de 0m,03. On en a tenu compte. La lecture des hauteurs d'eau a été faite sur des tubes en verre adaptés extérieurement aux deux extrémités de la conduite, de manière à donner des cotes suffisamment exactes. Le tube mobile était mieux guidé et retombait moins irrégulièrement sur son siège.

M. de Lagrené fait remarquer que l'appareil qui nous a servi le 1er mai 1873 était encore tout à fait rustique. Les assemblages n'étaient pas faits avec tout le soin possible, le tube mobile n'était pas parfaitement guidé et rebondissait encore un peu sur son siège. Il ajoute, dans son rapport du 12 mai de la même année, qu'un appareil d'une construction plus perfectionnée donnerait certainement un rendement meilleur. Ces réserves une fois faites, il termine son rapport en disant : « en résumé je crois que l'on peut conclure que la machine rustique essayée dans le jardin de l'Orangerie, donne moyennement un rendement un peu supérieur à 60 pour 100. Cette machine a été démontée et enlevée le 10 mai pour ne pas gêner le service des eaux et jardins de Versailles. »

Le tuyau de conduite avait une longueur développée de

27m,40 y compris le coude en quart de cercle dont le rayon moyen de courbure était d'environ 0m,60. La chute motrice moyenne était de 0m,615. La hauteur moyenne à laquelle l'eau se versait au-dessus du niveau du bief d'amont était à très peu près de 1m,06. La quantité d'eau élevée était de 353 litres. Celle qui était descendue était de 962 litres. Il en résulte que le rendement dépasse un peu 0,63 en eau élevée. L'expérience avait duré six minutes 25 secondes. C'est une de celles qui ont été les mieux faites, et qu'on peut prendre comme moyenne dans l'état d'imperfection où était l'appareil. Car il est bien à remarquer qu'il était présenté seulement comme une machine vraiment rustique. Le tuyau de conduite débouchait latéralement dans un grand réservoir servant de bief d'amont. La levée du tube mobile était en général réduite à 0m,015. Il est intéressant de rappeler quant aux petites levées, pour celles cependant qui sont notablement plus grandes, que, d'après des expériences signalées dans la première partie, l'écoulement se fait surtout dans la seconde portion des coudes à angle droit brusque. Or, ici il y a une déviation de la nappe annulaire liquide dont l'*écrasement* à sa sortie rentre dans les phénomènes de ce genre.

Dans les expériences faites à Versailles en 1872 et 1873, je n'ai pas eu assez d'eau pour répéter celles de 1867. Mais les résultats de ces nouvelles études faites dans des conditions peu favorables sont utiles pour montrer aux ingénieurs en quoi consiste l'état de ces questions.

Le siège fixe était à une profondeur moyenne d'environ 0m,35 au-dessous du niveau de l'eau du bief d'aval. On n'a pas encore déterminé le minimum de la profondeur dont on peut se contenter pour ce siège, afin d'obtenir le meilleur rendement possible dans les diverses circonstances qui peuvent se présenter.

Je retrouve une indication qui semble pouvoir permettre de se faire une idée des dimensions de la pièce centrale fixe, ce qui a d'ailleurs peu d'importance, puisque dans chaque

condition on sera obligé d'en déterminer la forme de manière à produire convenablement l'oscillation descendante. La quantité d'eau contenue dans le tube vertical pour la chute dont on vient de parler, entre le niveau d'amont et celui d'aval, aurait différé trop peu de celle qui était redescendue de l'espace compris au-dessous du sommet de ce tube.

Il est d'ailleurs à remarquer pour les expériences sur un nombre de périodes peu considérable qu'il faut, ainsi qu'on l'a fait dans cette circonstance, compter comme perdue en aval cette quantité d'eau qui était dans le tube vertical avant qu'il fût levé une première fois. Cela est évidemment au désavantage de la machine puisque le centre de gravité de cette quantité d'eau tombe au bief d'aval en pure perte. Il était intéressant de faire cette remarque pour fixer les idées sur le mode d'expérimentation. Mais l'erreur qui peut en résulter n'a qu'une importance très secondaire même quand l'expérience ne dure que quelques minutes pendant lesquelles les périodes sont déjà assez nombreuses.

Expériences sur des appareils de très petits diamètres.

Cet appareil qui a fonctionné avec des tuyaux de conduite de très grands diamètres a aussi l'avantage de pouvoir marcher régulièrement avec des tuyaux de conduite de très petites sections. Dans un modèle que j'ai déposé à l'école des ponts et chaussées le diamètre n'a que $0^{m},05$. Mais pour qu'on puisse avoir un rendement convenable il faut qu'on ait à utiliser, dans ce cas, une chute très petite. Il résulte de ce que j'ai dit dans la première partie, que le rapport du diamètre à la chute motrice ne doit pas être trop petit, si l'on veut éviter une perte considérable de travail en frottement.

Les chutes que j'ai employées pour ce petit diamètre ne dépassaient pas 0m,18. Le tube mobile a un diamètre de 0m,09. Le cylindre fixe terminé inférieurement par une partie conique assez allongée a un diamètre de 0m,07. Je préviens seulement, à cause de la difficulté quelconque résultant des ajustages des petites pièces et de la différence qui en provient dans le rapport des sections, etc., que le rendement sera moindre que pour de plus grandes dimensions, ce qui peut résulter d'ailleurs en partie de ce que l'étude n'en est pas complétée. Les phénomènes des résistances passives dans les petites vitesses suffiraient seuls pour expliquer une diminution sensible de rendement. Ces phénomènes s'opposent même à ce qu'on donne au tuyau de conduite fixe le rapport de la longueur à la chute motrice qui conviendrait le mieux au rendement pour de plus grandes dimensions. J'avais espéré pouvoir exagérer la longueur du tuyau de conduite fixe ; je me suis aperçu qu'il fallait la réduire au contraire dans ce cas. Or je ne saurais trop répéter que, dans des limites très étendues, la longueur du tuyau de conduite fixe est importante pour augmenter le rendement (1).

Dans les expériences plus en grand faites jusqu'à ce jour, toutes les fois que j'ai pu augmenter la longueur de ce tuyau j'ai augmenté le rendement. Enfin on peut compter, en attendant mieux, que, *pour ces diamètres très petits*, le rendement en *eau élevée* ne sera pas moindre qu'un tiers environ du travail dépensé quand on aura pu employer des proportions convenables.

En général pour tous les diamètres, il paraît convenable que le fond qui entoure le siège du tuyau fixe soit disposé comme une sorte d'entonnoir. C'est ce qui a été fait pour plusieurs de ces appareils. Mais on ne sait pas encore selon quelle loi

(1) Le diamètre intérieur du tuyau de conduite pour un modèle précité qui est au Conservatoire des Arts et Métiers n'a pas plus de 0m,025 Avec ces petites dimensions on a pu obtenir une marche régulière mais on n'a pas essayé de mesurer le rendement.

l'inclinaison dont il s'agit doit être déterminée. J'ai déjà eu occasion de remarquer, pour le cas où l'angle de cet entonnoir serait trop aigu, les inconvénients qui en résulteraient.

Expériences sur un appareil rustique en planches. — Transformation du système en moteur hydraulique à flotteur oscillant.

Cet appareil a été essayé d'une manière très rustique. Le tuyau de conduite de 13 mètres environ de long était formé de planches clouées, renforcées de place en place par des cadres en bois. La section intérieure était un carré de $0^m,60$ de côté. L'orifice sur lequel le tube mobile venait se poser alternativement était pratiqué dans la paroi supérieure à l'extrémité d'aval. Celle-ci était bouchée au moyen d'une planche qui, au lieu d'être posée verticalement était courbée de manière à rendre le coude un peu moins brusque. La chute motrice a varié de $0^m,50$ à $0^m,08$. L'eau était élevée à $1^m,50$ au-dessus du niveau du bief d'aval. L'appareil a marché régulièrement. Pour une chute de $0^m,40$ on élevait au moins 600 litres par minute: Mais pour la chute de $0^m,08$ la quantité d'eau élevée a été si petite qu'on indique cette chute seulement comme une limite inférieure. Je dois même dire que je n'ai pas constaté personnellement cette limite à laquelle je ne sais pas si la marche était régulière. On n'avait aucun moyen de mesurer le rendement, cet appareil d'essai étant provisoirement établi sur le barrage d'une rivière. J'en dis seulement quelques mots pour montrer avec quelle rusticité ce système peut être construit à très peu de frais pour les besoins de l'agriculture. Il y avait en général sept périodes par minute. On a remarqué que la quantité d'eau élevée avait été augmentée ainsi que le nombre des périodes, au

moyen d'un ressort formé par une planche portée sur deux pieux. Elle amortissait la percussion du tuyau vertical retombant sur son siège et contribuait à le faire relever plus vivement. J'attachais d'ailleurs peu d'importance à cette dernière considération parce que l'inertie de la colonne liquide contenue dans le tuyau de conduite ne permet pas à l'eau motrice de prendre immédiatement une vitesse notable. Il est beaucoup plus essentiel de pouvoir faire retomber le tube très vite sans qu'il en résulte aucun inconvénient. Cette planche flexible paraît mériter d'être signalée pour les appareils rustiques, quoique, pour une machine qui serait faite avec assez de soin, le frein hydraulique appliqué à l'écluse de l'Aubois semble préférable à certains égards. Le tube mobile vertical était aussi en planches, sa section intérieure était un carré de $0^m,70$ de côté. Son extrémité inférieure avait d'ailleurs la même section que le tuyau de conduite. La collerette relevée extérieurement, et comparée ci-dessus à une sorte de parapluie renversé percé par le milieu, était composée ici de quatre planches relevées et clouées ensemble en forme de trémie. La pièce centrale fixe, de section quadrangulaire, était une caisse en bois terminée inférieurement par une pyramide solidement fixée comme la pièce de bois employée à Chaillot. Le sommet de cette pièce était attaché à deux pieux un ajutage convergent était en amont du tuyau de 13 mètres.

Cependant quand on voulait, on lui permettait de monter et de descendre alternativement pour faire fonction de flotteur. On a constaté ainsi qu'au lieu d'être employée à élever de l'eau, cette machine pouvait servir comme moteur hydraulique à flotteur oscillant. Quand la chute motrice est très variable, cette forme du flotteur oscillant est plus convenable que celle dont j'ai donné ci-dessus la description.

Il est facile de voir que ce système de flotteur conduit à des résultats parfaitement analogues à ceux qui ont été exposés plus haut et même que les conditions du maximun de rendement reposent sur des considérations semblables. De

sorte qu'il n'est pas nécessaire d'entrer dans plus de détails à ce sujet (1).

Les différences essentielles entre ces deux systèmes de flotteur consistent dans le mode d'introduction de l'eau. Celui qui a été l'objet des expériences précitées de 1843 a l'avantage d'obtenir cette introduction en dépensant moins de force vive et sans qu'on soit obligé de prendre autant de précautions pour empêcher la percussion du tube mobile sur son siège. On conçoit d'ailleurs que, si pour de très grandes di-

(1) Pour donner un exemple de ce genre de considération il suffit de choisir un cas très simple. Je suppose que le flotteur ait une longueur tout au plus aussi grande que la hauteur de chute, le rapport de sa section à celle du tuyau vertical étant analogue à celui qui avait été adopté pour les expériences précitées de 1842 et 1843. Nous avons vu que pour ce premier système on pouvait, dans certaines limites, calculer le travail en résistances passives dans l'oscillation remontante comme si le flotteur avait été tenu en repos, une quantité donnée du tuyau vertical devant être alors remplie jusqu'au niveau du bief d'amont. Dans le système dont il s'agit maintenant, le flotteur agissant sur la résistance industrielle à vaincre ne conserve qu'une faible partie de son poids, quant à son action sur la colonne liquide descendante. Or, il faut vider une quantité donnée du tube vertical jusqu'à une assez petite hauteur au-dessus du niveau du bief d'aval. On peut donc supposer, alors dans certaines limites, que les choses se passent, relativement au travail en résistances passives, à peu près comme si le flotteur était tenu en repos. On voit d'après cela quel degré d'analogie il y a entre le travail en résistances passives pour l'oscillation ascendante dans le premier système, et l'oscillation descendante dans le second. Quant à celui-ci il faut tenir compte de ce que la perte de force vive quelconque, résultant de ce qui reste de vitesse à l'eau lorsqu'elle entre au bief inférieur, n'est pas la même que celle qui résulte pour le premier de la contraction de la veine liquide pendant l'oscillation remontante. Mais il faut aussi avoir égard à ce que, pour les deux autres parties des oscillations comparées, il y a des considérations semblables précisément en sens contraires. A la rigueur il faudrait aussi tenir compte de ce que, pour un des systèmes le mouvement de l'eau par rapport au flotteur alternativement atteint ou abandonné par la colonne liquide, est en sens contraire pour chaque partie d'une grandeur donnée de l'oscillation. Mais il ne s'agit ici que d'indiquer la marche des résultats d'une manière assez approximative pour qu'on puisse les comparer.

mensions, au lieu de rendre le tube vertical en entier mobile, on emploie une soupape de Cornwall, cela est moins simple que la soupape annulaire à un seul siège, essayée avec succès pour l'autre système de flotteur. Quant au rendement définitif, lorsque l'eau est introduite au-dessous du flotteur, on a vu ci-dessus quelles sont les conditions diverses dont on aura à s'occuper selon la longueur qu'on pourra donner au tuyau de conduite.

Considérations spécialement relatives aux appareils de grandes dimensions.

Quand on veut élever l'eau à une grande hauteur il n'est pas nécessaire que le tube vertical soit en entier mobile. On peut ne rendre mobile qu'une vanne cylindrique ou une soupape de Cornwall, dont la partie inférieure porte le parapluie renversé. La figure 28, planche VIII, donne une idée de cette disposition pour le cas où l'on substitue un flotteur au balancier. Cette figure sert aussi à montrer l'application des lames courbes concentriques indiquées p. 335 et 402, pour diminuer la résistance dans un coude, même quand il n'a pas de courbure à l'intérieur.

Dans cette figure et plusieurs autres de la même planche, on n'a pas dessiné le rebord extérieur dont l'utilité a été cependant constatée par les expériences de 1872 et 1873. Non-seulement il suffit de signaler les propriétés de ce rebord, mais la réussite des nouveaux freins hydrauliques appliqués à l'écluse de l'Aubois en diminue beaucoup l'importance. Il peut être cependant intéressant d'en conserver la trace, pour les appareils rustiques. On conçoit, en effet, qu'il est important que le tube mobile rencontre en descendant le moins de résistance possible. A ce point de vue, l'existence de ce rebord est un inconvénient et c'était par cette raison que j'avais essayé de le supprimer en 1873. Aujourd'hui les nou-

veaux freins hydrauliques permettent d'amortir aussi complètement qu'on le veut la percussion du tube sur son siège. Rien n'empêche, quand la construction d'un grand appareil sera assez soignée, de supprimer un rebord extérieur n'ayant d'autre but que d'augmenter la résistance au mouvement dans l'eau du bief d'aval.

Il sera même convenable, quand on emploiera un balancier à contrepoids, de disposer au-dessus du parapluie renversé une surface ayant pour but de diminuer la résistance à l'enfoncement de cette pièce dans l'eau du bief inférieur. Il résultera d'ailleurs de cette disposition une sorte de flotteur qui pourra venir en aide au mode d'action du balancier. Au reste abstraction faite de l'emploi d'un frein hydraulique, nous avons vu que pour des machines assez puissantes on pourra amortir la percussion du tube sur son siège en utilisant, au moyen d'une pompe, le mouvement acquis de ce tube. Il est donc rationnel à divers points de vue de faire en sorte de diminuer la résistance à la descente du tube, du moins pour les constructions sur une assez grande échelle qui ne seront pas trop rustiques.

Nouveau barrage mobile

Cette machine peut être considérée comme un barrage mobile, même dans le cas où l'on n'aurait pas besoin de s'en servir comme appareil à élever de l'eau. Nous avons vu que, dans certaines conditions d'équilibre, il se produit des trépidations qui peuvent faire lever le tube de lui-même si une veine liquide résultant d'un *trop-plein* venait concourir à l'effet de ces trépidations.

Je suppose le tube levé et retenu dans cette position par un flotteur qui serait dans l'eau du bief d'amont. Celle-ci en passant par l'orifice inférieur résultant de la levée du tube mobile, tendrait à faire redescendre ce dernier si le flotteur

qui le soutient était baissé en vertu de l'écoulement de l'eau. Les phénomènes de succion sont d'autant plus puissants, toutes choses égales d'ailleurs, que le tube est plus près de son siège. On conçoit déjà qu'il y a une raison pour que ce tube revienne intercepter la communication entre les deux biefs en temps utile, pour le règlement des niveaux. Il ne serait pas nécessaire, si l'on voulait ainsi avoir seulement un nouveau barrage mobile, que le tuyau de conduite eût une longueur notable. Il ne serait pas non plus indispensable que ce tube mobile reposant sur son siège s'élevât plus haut que la limite supérieure du niveau d'amont. La force de succion étant d'autant plus grande que la vitesse est plus considérable, si le flotteur dépasse toujours le niveau de l'eau d'amont, on conçoit qu'il pourra être disposé de manière à ne permettre au tube de redescendre que lorsqu'une certaine profondeur sera atteinte par le niveau du liquide dans le bief inférieur.

CONCLUSIONS.

Le système, objet de ce chapitre, est peut-être moins intéressant quant à son principe que celui pour lequel l'Académie des sciences m'a fait l'honneur de me décerner le prix de mécanique. Mais il est plus simple, repose d'ailleurs sur des phénomènes de succion nouveaux, a été construit avec succès sur une très grande échelle, et aussi avec de très petites dimensions. C'est d'ailleurs au moyen de son principe que j'ai résolu le problème de l'épargne de l'eau dans les écluses de navigation, tout en accélérant au besoin leur service.

Ce système est celui que j'ai spécialement choisi pour les expositions universelles comme le type le plus simple (1) des

(1) En 1852, il a été honoré d'une médaille d'or par la Société centrale d'agriculture, et en 1855, d'une médaille de 1re classe à l'exposition universelle de Paris. Une médaille d'argent m'a été décernée pour la

appareils de mon invention ayant pour but d'élever de l'eau au moyen d'une chute motrice. Il peut d'ailleurs être transformé en moteur hydraulique à flotteur oscillant. Dans diverses circonstances, même sans flotteur, il est avantageusement applicable pour faire des épuisements. Il peut aussi être transformé en appareil à élever de l'eau sous une forme très différente de celles qui ont été exécutées. Il est alors sans oscillation en retour vers le bief d'amont, au moyen d'une combinaison de colonnes liquides oscillantes ayant une grande analogie avec le mécanisme de l'onde dite *solitaire*.

Enfin quand on n'a pas besoin d'élever de l'eau, son principe conduit d'une manière extrêmement simple à un nouveau barrage mobile qui doit même être automatique. On verra dans le chapitre suivant comment l'appareil élévatoire à tube oscillant peut être transformé en machine soufflante, ou à compression d'air.

On a vu, dans les diverses séries d'expériences, que le rendement était très différent selon les conditions que l'on avait à remplir. C'est surtout pour les grands diamètres et les élévations d'eau ne dépassant pas certaines limites par rapport à la chute motrice, que l'on doit compter sur un rendement considérable. Tel est le cas des écluses de navigation dont on veut relever une partie de l'eau au bief supérieur. L'inconvénient de cette machine, quand on a besoin d'un rendement considérable, consiste en ce que le tuyau de conduite doit avoir en général une assez grande longueur par rapport à la chute motrice. Lorsqu'il n'est pas relativement à la chute aussi long à beaucoup près qu'il ne l'a été pour les expériences officielles, le rendement peut, comme je l'ai dit pour les pre-

nouvelle série d'expériences faite à l'exposition universelle de 1867. La médaille de progrès m'a été décernée à l'exposition universelle de Vienne, en 1873, pour l'application faite à l'écluse de l'Aubois et à l'exposition universelle de 1878 un rappel de médaille d'argent m'a été décerné pour la même application qui a d'ailleurs été perfectionnée depuis cette époque.

mières expériences faites à Saint-Germain-en-Laye, se réduire à environ un tiers du travail dépensé. Dans diverses circonstances dont les expériences précitées indiquent les conditions, le rendement peut varier de 40 à 50, à 60 peut-être à 70 pour 100 en eau élevée. Il y a lieu d'espérer qu'on pourra augmenter ce dernier rendement (1). Les ingénieurs qui emploieront cet appareil exécuteront d'ailleurs, sans doute, quelques modifications de détail.

Ainsi, M. Chemin, ingénieur des ponts et chaussées, qui a eu occasion de s'en servir, a employé comme contrepoids un vase alternativement rempli d'eau.

Pour éviter tout malentendu je dois rappeler qu'un des auteurs qui ont parlé de cet appareil, d'ailleurs avec bienveillance, n'a pas remarqué que j'avais disposé la pièce cen-

(1) On peut former le contrepoids d'une chaîne analogue à celle du pont-levis de M. le général Poncelet. Il en résulte que le tuyau mobile peut se lever plus haut, au commencement de sa descente une succion moins forte étant suffisante. Or, comme la force de succion augmente en général à mesure que ce tube s'approche de son siège fixe, cette disposition semble très rationnelle. J'ai même employé un contrepoids formé tout simplement d'une chaîne qui venait alternativement se poser en partie sur le sol.

Il y aura lieu d'essayer, même lorsque l'on substituera un flotteur au balancier, si l'on pourra profiter de la vitesse acquise du tube mobile. Mais quant à présent, au lieu d'employer cette force vive au moyen d'un balancier ou d'un flotteur, je me suis contenté de l'amortir de manière qu'elle ne soit pas nuisible. Le moyen le plus efficace pour cela me paraît être le frein hydraulique nouveau appliqué à l'écluse de l'Aubois. Il y aura d'ailleurs lieu d'examiner si, en compliquant un peu l'appareil, on n'augmentera pas le rendement au moyen d'un encliquitage, qu'il suffira de faire lâcher aux époques où cela sera utile, quand on voudra que le tube retombe.

Selon le rapport du jury de l'exposition universelle de 1867, si une roue hydraulique fait mouvoir une pompe, le rendement de la roue est d'environ 60 p. 100, et celui en eau élevée par la pompe est une fraction de cette fraction, soit environ les 75 centièmes, ce qui donne un rendement total de 45 p. 100. Il n'est pas même nécessaire de supposer qu'il soit aussi peu considérable pour apprécier ceux qui ont été obtenus au moyen de l'appareil, objet de ce chapitre, dont au reste l'extrême simplicité est le caractère le plus essentiel.

trale fixe au-dessus du niveau d'amont et le renflement du tube mobile au-dessous de ce même niveau, de manière à faire en sorte que l'oscillation en retour ne descende pas au-dessous du niveau du bief d'aval. Il en a conclu que les hauteurs auxquelles on pouvait élever de l'eau avec avantage étaient beaucoup plus restreintes par rapport à la chute qu'elles ne le sont, d'après les dispositions précitées.

La véritable cause qui limite les hauteurs dont il s'agit résulte de ce que, d'après les formules exposées dans la première partie, il ne faut pas qu'à chaque période, le chemin parcouru par la colonne liquide soit trop grand relativement au diamètre du tuyau de conduite. Il ne faut pas non plus que la pièce centrale fixe ait une section assez considérable, par rapport à celle du tube vertical pour que le travail en frottement entre ses parois et celles de ce tube soit trop grand relativement au travail en frottement dans le tuyau de conduite. Ce dernier doit, comme je l'ai dit, être d'autant plus long, dans des limites très étendues, qu'on veut ainsi élever l'eau à de plus grandes hauteurs. Cette longueur a au reste entre autres avantages celui de permettre de diminuer la hauteur du jaillissement de l'eau au sommet de l'appareil.

Il est essentiel, pour éviter un autre malentendu, de faire observer que, si l'appareil est réglé de manière à donner à peu près le maximum de rendement, le niveau d'amont ne pourra s'élever que d'une assez petite quantité sans que la machine s'arrête. De sorte qu'il faut prendre les précautions précitées pour augmenter le débit. Mais le niveau d'amont peut baisser considérablement et celui d'aval peut monter considérablement sans que cela interrompe la marche de l'appareil entièrement abandonné à lui-même. Seulement alors, il ne sera plus dans les conditions qui conduisent au maximum de rendement. Quant à l'exhaussement du niveau d'amont, si l'on ne peut l'empêcher par la disposition qui permet de faire débiter beaucoup plus d'eau à la machine sans qu'elle s'arrête, je reconnais que l'intervention d'un sur-

veillant sera nécessaire pour régler la levée du tube mobile et son contrepoids (1).

Les phénomènes de succion sur lesquels le jeu de cet appareil repose ont été dans ces derniers temps considérés comme ayant leurs analogues dans ceux de l'électricité. Je crois devoir rappeler que je les ai signalés le premier en citant d'ailleurs tout ce qui pouvait avoir avec eux la moindre ressemblance. Voir aussi l'extrait du procès-verbal de la Société philomathique du 17 mai 1851 (Journal l'*Institut.*)

(1) Quand on ne rend mobile qu'une vanne cylindrique ou une soupape de Cornwall, il est intéressant d'examiner, comme on me l'avait conseillé avant que j'eusse trouvé les phénomènes de succion au moyen desquels elle fonctionne, s'il ne vaudrait pas mieux la faire soulever que de la faire descendre pour interrompre la communication avec le bief inférieur. J'ai expliqué planche VII, figure 5, p. 634 et suivantes, comment j'ai fait soulever ainsi une soupape de Cornwall. Il s'agit de couper de la manière la plus avantageuse la veine annulaire de sortie. Or, il y a des raisons de penser que, toutes choses égales d'ailleurs, il vaudrait mieux la couper de bas en haut que de haut en bas, afin que le mouvement intercepté se reportât plus directement sur la partie de la veine liquide annulaire qui continue à sortir jusqu'à la fin de la course de la soupape.

Pour l'appareil, objet de ce chapitre, je n'ai pas encore employé de soupape annulaire, ayant toujours rendu le tube vertical entièrement mobile. Il n'en est résulté aucune percussion capable d'endommager des tubes d'un grand diamètre et de matériaux très peu résistants. Or il paraît plus simple, en général, quant à la construction, lorsqu'on emploie une soupape annulaire, de disposer sa course plutôt au-dessus qu'au-dessous du siège fixe. D'ailleurs, dans les limites du possible, un tube en entier mobile, au-dessus d'un seul siège fixe, est d'une remarquable simplicité.

Dans l'appareil représenté par la figure que je viens de rappeler, la soupape est relevée de bas en haut, il est vrai, mais à contre-courant. Il y a donc lieu de croire que, si elle l'était dans le sens du courant, la force de succion qui la fait fonctionner s'exercerait plus facilement. C'est dans le sens du courant que marchent les soupapes annulaires représentées planche VII. Quant aux phénomènes de succion à contre-courant qui ramènent le tube mobile sur son siège dans les expériences, objet de ce chapitre, il y a lieu de les croire plus puissants que ceux qui soulèveraient un tube mobile dans le sens du courant. Quoi qu'il en soit, il paraît intéressant de conserver la trace de cette dernière disposition.

MACHINES SOUFFLANTES

OU A COMPRESSION D'AIR

Appareil où la colonne liquide avant le commencement de la compression est animée de vitesses résultant d'un écoulement au bief inférieur.

Au lieu d'être employé à élever de l'eau l'appareil, objet du chapitre précédent, peut être transformé en machine soufflante ou à compression d'air ainsi que plusieurs systèmes de mon invention qui ne peuvent d'ailleurs marcher sans repousser de l'air.

Dans le Bulletin de la Société philomathique du 2 novembre 1850 (journal l'*Institut*) du 20 novembre 1850, je m'exprimais ainsi : « Il n'est pas nécessaire que le tuyau vertical « soit en entier mobile. On peut ne rendre mobile qu'une « soupape de Cornwall. Alors cet appareil peut être employé « à comprimer de l'air au moyen d'un piston liquide, soit « pour une machine soufflante, soit pour faire des épuise- « ments avec une sorte de récipient de fontaine de Héron... »

Avant de savoir que cet appareil pouvait être exécuté. d'une manière aussi simple au moyen de phénomènes nouveaux de succion, j'avais communiqué à la Société philomathique, le 22 juin 1844, la note suivante publiée par le journal l'*Institut*, du 3 juillet 1844, n° 549, p. 228.

« M. de Caligny communique à la Société un moyen de trans-
« former en machine soufflante un des appareils à élever de
« l'eau qu'il a présentés en 1837.

« Le bélier hydraulique de Montgolfier, introduisant périodique-
« ment dans un réservoir d'air de l'eau qui ne revient point sur
« ses pas, ne peut pas être considéré comme une machine souf-
« flante de la même manière que le bélier univalve de M. de Ca-
« ligny, dans lequel le tuyau d'ascension se vide périodiquement
« par un retour vers la source, quand l'eau élevée s'est dégorgée
« par son sommet. Il est clair que, dans ce dernier système, un vo-
« lume d'air égal à celui du chemin abandonné alternativement
« par cette colonne est périodiquement chassé par son sommet. On
« peut donc, en disposant vers ce sommet des soupapes qui per-
« mettront à l'air extérieur de rentrer pendant le retour de la co-
« lonne liquide, employer le travail de la machine à comprimer de
« l'air dans un réservoir latéral, au lieu de l'employer à verser pé-
« riodiquement de l'eau au dessus du niveau de la source. Pour de
« grandes dimensions, la soupape du bélier univalve est, si on se le
« rappelle, remplacée par une soupape cylindrique à double siège
« dite de Cornwall, qui, en s'ouvrant alternativement, permet à la
« force vive de s'emmagasiner dans le corps de bélier, tout étant
« d'ailleurs disposé de manière qu'il n'y ait point de *percussion*
« *brusque* dans le système. Cette machine soufflante ou à compres-
« sion d'air serait immédiatement applicable à divers appareils à
« air comprimé, si leur utilité pratique était suffisamment éta-
« blie. »

On voit, d'après ces derniers mots, que j'avais signalé le principe des machines à compression d'air au moyen du mouvement acquis des colonnes liquides à une époque déjà ancienne où l'on n'était pas encore bien fixé sur le degré d'utilité que pouvait avoir l'emploi de l'air comprimé. Je me servais alors, pour me faire plus facilement comprendre de la dénomination de bélier univalve. J'ai déjà rappelé que M. le général Poncelet m'a conseillé de donner à toute cette classe de machines le nom d'*anti-béliers*.

Les conditions qui conduisent au maximum de rendement reposent sur des principes parfaitement analogues à ceux qui ont été présentés ci-dessus pour la machine considérée

comme élévatoire. Mais il faut, bien entendu, avoir égard à ce que le travail employé à chaque changement de période n'est pas le même que pour cette dernière. Cela dépend de la tension qu'on veut donner à l'air comprimé. S'il ne s'agit que d'une machine soufflante ou en un mot ne comprimant l'air qu'à une tension assez petite par rapport à la pression hydrostatique qui résulterait de la hauteur de chute, l'oscillation en retour serait occasionnée principalement par la descente de l'eau qu'il aurait fallu élever au dessus du niveau d'amont. On conçoit qu'à la limite cette oscillation en retour se ferait de la même manière que pour la machine élévatoire.

Si l'on était obligé à chaque période de refouler toute la quantité d'air contenue dans le tube d'ascension tel qu'il vient d'être considéré, le travail recueilli pourrait être beaucoup plus grand que celui qui conduirait au maximum de rendement. Mais on peut avoir égard à cette considération en permettant à l'air de s'échapper jusqu'à ce que la colonne liquide soit parvenue à une hauteur donnée. Cela est évidemment facile au moyen d'une soupape alternativement fermée par un flotteur.

Le 9 décembre 1844, j'ai présenté à l'Académie des sciences, un Mémoire sur une machine soufflante enregistré au secrétariat de l'Institut, sous le n° 377. Il a été publié dans le journal de mathématiques de M. Liouville, 2e série, t. XIII, 1868. Un long extrait du même mémoire avait été imprimé par mes confrères de l'Académie des sciences de Turin, dans la notice historique sur les travaux de cette académie, pour l'année 1839. Il n'est pas nécessaire de le reproduire ici à cause des divers documents publiés dans cet ouvrage. Un extrait du même travail a été inséré dans le tome XIX des *comptes rendus* des séances de l'Académie des sciences. Il ne s'agissait que de l'emploi du mouvement acquis par un écoulement de l'eau à l'extérieur avant l'époque où la com pression de l'air commençait.

Application proposée à la chute de Marly.

Cette forme du compresseur hydraulique permet d'obtenir des tensions élevées au moyen de chutes médiocres. Il est d'ailleurs à remarquer que le chemin parcouru par les résistances passives peut être beaucoup moindre que pour l'appareil considéré comme élevant de l'eau sans comprimer de l'air. Je dois à ce sujet, pour éviter un malentendu relativement à la nouvelle théorie de la chaleur, dire que dans tout le cours de cet ouvrage, lorsque je me suis servi des expressions *perte de force vive*, j'ai voulu seulement exprimer que la force vive était perdue quant au travail industriel qu'il s'agissait d'obtenir.

J'ai bien clairement signalé dans une note précitée de 1844, que cette machine était applicable à la compression de l'air pour divers appareils à air comprimé dont on s'occupait à cette époque sans que leur utilité fût aussi généralement reconnue qu'aujourd'hui. Cependant pour ne laisser aucun doute, je crois intéressant de reproduire le certificat suivant signé par M. Vauchelle, légalisé à la mairie et à la préfecture de Versailles, et publié par l'Académie des sciences de Turin, dans son volume pour l'année 1859.

« Nous, intendant militaire du cadre de réserve, grand officier de « la Légion d'honneur, ancien maire de Versailles, certifions que « pendant notre administration, qui cessa en 1852, M. le marquis « de Caligny, qui demeurait alors à Saint-Germain-en-Laye, pro- « posa, par une lettre destinée à être mise sous les yeux du conseil « municipal de Versailles, d'employer tout ou partie de ce qui res- « terait d'eau disponible à la chute de Marly, quand Versailles « serait approvisionné d'eau, pour comprimer de l'air au moyen « d'un des appareils de son invention, afin de procurer un moteur « à cette ville, qui pourrait en louer à ses industriels.

« Il ne put être donné suite à cette proposition, les travaux de

« Marly n'ayant été commencés que longtemps après, et n'étant pas « encore finis.

« Nous certifions en outre, qu'il est à la connaissance de M. le « baron de Saint Germain, notre ancien adjoint, et de M. Fouquet, « commis au secrétariat de la mairie, que cette lettre a existé; « mais toute recherche pour la retrouver a été jusqu'à présent inu- « tile.

« En foi de quoi nous avons délivré le présent pour servir et « valoir ce que de droit.

« A Versailles, le 28 mars 1859. »

Détails relatifs à une expérience de Mongolfier mentionnée dans le Journal de l'Ecole polytechnique.

Longtemps après avoir trouvé les principes précédents, j'ai pensé qu'il pourrait être utile d'essayer de recueillir tout ce que Montgolfier aurait pu avoir dit, même verbalement, sur la possibilité de se servir du bélier hydraulique pour obtenir une machine soufflante ou à comprimer de l'air. Je me suis donc adressé directement à M. Seguin, Correspondant de l'Institut, neveu de Mongolfier. Dans une lettre qu'il m'a fait l'honneur de m'écrire le 25 janvier 1860, il s'est exprimé ainsi relativement à cette question.

« ... Je puis vous dire, je crois en pleine connaissance de cause, « que la seule et unique idée de mon oncle Montgolfier en inven- « tant le bélier hydraulique, a été de donner aux arts et à l'agri- « culture un moyen d'employer directement, et le plus efficacement « possible, la force développée par la chute de l'eau, à l'élévation « d'une partie de cette même eau à des hauteurs indéfinies.

« Le bélier hydraulique ne fut pour mon oncle qu'une applica- « tion partielle d'un principe que lui avait révélé son vaste et im- « mense génie, savoir que le mouvement a une existence aussi « réelle que la matière, qu'il ne peut être ni créé ni annihilé, et, « qu'une fois produit, il se perpétue indéfiniment jusqu'à ce que « les causes qui lui avaient donné naissance se reproduisent en sens

« inverse, de manière à ramener les corps qu'il avait affectés
« d'abord, à l'état de repos.

« J'ai vu dans des expériences faites vers l'année 1800, rue des
« Juifs, n° 18, au Marais, où mon oncle était logé alors, la tension
« du réservoir d'air destiné à régulariser la pression sur la nappe
« d'eau, qui communiquait au tuyau d'ascension, s'élever jusqu'à
« une pression représentée par quarante-deux atmosphères, ce qui
« eût suffi pour élever l'eau à plus de quatre cents mètres de hau-
« teur. Mais je ne lui ai jamais entendu dire qu'il eût eu l'inten-
« tion de l'appliquer, ni à des machines soufflantes, ni à des
« machines de compression.

« Je désire, Monsieur, que ces renseignements puissent remplir
« l'objet que vous vous êtes proposé en me faisant l'honneur de
« vous adresser à moi.....»

La rue des Juifs étant loin de tous les quartiers élevés de Paris, j'ai cru pouvoir en conclure que l'expérience mentionnée dans la lettre de M. Seguin, et dont Mongolfier avait dit lui-même quelques mots, dans le *Journal de l'Ecole polytechnique*, avril 1808, 14ᵉ cahier, p. 297, avait pour objet la compression de l'air dans une cloche, qui n'élevait pas d'eau. J'ai donc cru devoir demander à M. Seguin quelques explications à ce sujet.

Il m'a fait l'honneur de m'envoyer un croquis de cet appareil dans une lettre du 27 octobre 1860. Il s'agissait d'un bélier hydraulique ordinaire, dont, en effet, on bouchait d'abord avec un robinet le tuyau d'ascension, quand on voulait expérimenter sur ces pressions élevées. La cloche était, me dit-il, en cristal; elle pouvait avoir quarante à cinquante centimètres de hauteur, dix à douze centimètres de diamètre et un centimètre d'épaisseur.

On faisait jouer le bélier jusqu'à ce qu'un manomètre disposé à l'intérieur même de la cloche en cristal, servant de récipient, indiquât une pression de quarante atmosphères; et à mesure qu'on approchait de ce terme, on faisait éloigner les femmes et les enfants en prévenant les curieux du danger auquel ils s'exposaient en assistant à l'expérience. Les deux

extrémités supérieure et inférieure de la cloche étaient retenues par deux plaques en fer, qui la serraient fortement au moyen de boulons.

D'après les détails qui précédent, Montgolfier avait exécuté une machine à comprimer de l'air, qui a fonctionné sans élever de l'eau. Mais il est certain que dans l'état où était alors la science, il n'a point pensé à proposer une machine ayant pour but de comprimer ou de souffler de l'air sur une grande échelle, de manière, en un mot, que le résultat pût être appliqué à l'*industrie*, comme on l'entend aujourd'hui (1).

Ce qui a complètement changé l'état de la question, c'est l'application que j'ai proposée des vannes cylindriques ou des soupapes de Cornwall aux machines hydrauliques de ce genre.

J'ai montré le premier d'immenses colonnes liquides fonctionnant par ce moyen, *même dans des enveloppes fragiles*, sans aucun coup de bélier possible, parce que les *sections transversales ne sont jamais bouchées*. Je suis d'ailleurs le premier qui pour ces grandes colonnes liquides ait signalé le principe auquel j'ai donné le nom de *principe des vitesses continues*.

Déjà dans les *Annales des mines*, année 1838, page 455, tome XIV de la troisième série, je m'exprimais ainsi relativement à une application du bélier univalve à la compression d'une assez grande masse d'air.

« .... On peut, dans ce cas, *diminuer le chemin des résistances pas-*
« *sives*, au moyen d'un assez grand *matelas d'air* qui, substitué au
« tuyau d'ascension, *changerait le sens de la vitesse de la colonne*. Il

(1) Witehurst, dans son bélier hydraulique publié par les Transactions de la Société royale de Londres, en 1775, avait aussi un réservoir d'air. Mais la marche de son appareil n'était pas automatique, comme celui de Montgolfier qui, d'ailleurs, ne connaissait pas les recherches du savant anglais, dont le nom doit être rappelé pour compléter les recherches historiques sur ce sujet.

« n'y aurait dans ce changement aucun choc brusque, la pression « augmenterait *graduellement* dans le matelas d'air, et produirait « peut-être à peu près le même effet sur la colonne qu'une augmen- « tation graduelle de la pesanteur.... »

Appareil où la colonne liquide part du repos quand elle commence à refouler l'air. — Application au tunnel du mont Cenis.

On peut aussi faire comprimer l'air en vertu de la force vive de l'eau partant du repos, à l'instant où il commence à être refoulé. C'est ce dernier principe qui a été employé à comprimer l'air pour le percement du mont Cenis. Je l'avais indiqué dans l'extrait du procès-verbal, de la séance de la Société philomathique, du 8 août 1846, publié dans le journal *l'Institut,* du 26 août de la même année, n° 660, page 288. Il suffit de reproduire le passage suivant. Après avoir dit qu'il est à peine nécessaire de remarquer que les appareils de mon invention sont susceptibles d'être variés d'un grand nombre de manières, j'ajoutais : « Si, par exemple, la ma- « chine soufflante, décrite dans la séance du 22 juin 1844, est « conçue, comme refoulant immédiatement une colonne « d'air, dans un tuyau ou réservoir très large, on peut, au « moyen d'une disposition dont le principe est analogue à « celui de l'espèce de soupape cylindrique, décrite dans la « séance, du 20 juillet 1839, faire fonctionner l'appareil « d'une manière également simple, la soupape cylindrique, « percée ici à ses deux extrémités, pouvant descendre au « moment voulu, en vertu d'un surcroît de pression de haut « en bas, et se relever aussi à l'instant voulu, par un des « moyens indiqués dans des communications déjà an- « ciennes..... »

On a vu dans la note du mois de juin 1844, reproduite ci-dessus, qu'il s'agissait non seulement des machines soufflantes, mais aussi des machines à comprimer de l'air. Quant

à la communication du 20 juillet 1839, publiée dans le journal *l'Institut* du 8 août 1839, n° 293, page 271 ; il suffit de rappeler qu'il s'agissait d'un appareil où la colonne liquide partait du repos, au moment où son ascension commençait. C'est d'ailleurs le même appareil qui a fonctionné en présence d'une commission de l'Institut à l'école des mines en 1837 (Voir ci-dessus, pages 708 à 710). Il est intéressant de rappeler, comme je l'ai fait a l'Institut, en réclamant le témoignage de MM. Combes et Séguier, qui avaient assisté à l'expérience, qu'il y avait un orifice latéral alternativement bouché par un flotteur. Ce détail n'est pas sans quelque intérêt pour montrer, comme j'en ai déjà dit quelques mots que, si l'appareil est transformé en machine soufflante ou à compression d'air, on peut graduer à volonté la quantité d'air sur laquelle on veut faire agir la colonne liquide comprimante.

Quand cette colonne part du repos au moment où elle commence à comprimer l'air, il est facile de calculer, abstraction faite des résistances passives, au moyen des logarithmes hyperboliques, le degré de la tension de l'air qui pourra être obtenue dans une chambre de compression, analogue à celles qui ont été employées au mont Cenis, en vertu de la force vive acquise par l'eau pendant cette compression. Mais il en résulte que, pour des petites chutes motrices, la tension de l'air qui pourrait être obtenue par ce moyen serait assez restreinte. Elle pourrait, il est vrai, être notablement augmentée, si l'on diminuait, comme je viens de l'expliquer, la masse d'air sur laquelle la colonne liquide agirait. Mais, en général, il serait bien plus simple d'employer, comme cela est indiqué dans le paragraphe précédent, un écoulement préalable à l'extérieur pour emmagasiner de la force vive au moyen d'un tuyau-soupape à mouvement alternatif (1).

(1) Je dois dire que je n'avais pas signalé la possibilité de varier, par le moyen d'un orifice latéral, la masse d'air sur laquelle la colonne liquide agit en vertu de sa force vive pour la comprimer. Ce détail

Pour les chutes très grandes, comme celles dont on disposait sur le versant italien du mont Cenis, le cas est très différent de celui des chutes ordinaires.

Le régulateur que je viens de rappeler est dessiné figure 3, planche 1. J'ai donné, pages 97 et 709 (à cette dernière il faut lire figure 3, au lieu de figure 15), quelques détails sur le principe qui le fait fonctionner. Je remarquerai seulement ici qu'il était disposé de manière à ne pas permettre à l'orifice d'introduction et à celui d'évacuation de communiquer ensemble. Cela est d'autant plus intéressant qu'on a reconnu à Bardonnèche, sur le versant italien, qu'il y avait du danger à rendre cette communication possible.

J'avais indiqué d'ailleurs divers moyens d'établir alternativement les communications, en employant des vannes cylindriques ou des soupapes de Cornwall, même quand on ne cherche pas à éviter de boucher alternativement les sections transversales des tuyaux. On en a déjà vu ci-dessus, planche VII, des exemples pour plusieurs de mes premiers appareils. Il n'est pas nécessaire d'entrer dans ces détails sur lesquels j'aurai occasion de revenir.

Quelque soit le système de fermeture alternative employé,

résultait d'ailleurs implicitement de la disposition de cet orifice latéral, bouché alternativement par un flotteur, et qui n'avait au reste pour but, dans le modèle précité, que de simplifier la construction du régulateur, car il aurait suffi de ménager une retraite dans le tuyau d'ascension pour y faire fonctionner le flotteur. Aussi, quand j'ai dessiné ce régulateur dans le Technologiste de 1850, je n'ai point rappelé cet orifice, la colonne liquide pouvant être censée agir, pendant toute son ascension, sur la totalité de l'air contenu dans le tuyau vertical.

Quant au tiroir, il est d'autant plus intéressant de rappeler que les pressions *latérales* de l'eau étaient contre-balancées au moyen de la circulation tout autour de cette pièce, c'est-à-dire dans une retraite annulaire, qu'à l'exemple de cet appareil on a depuis appliqué le même système de circulation par une retraite annulaire pour la vapeur, dans une machine à vapeur signalée par la Société d'encouragement pour l'industrie française, dans son bulletin de 1858, plus de vingt ans après.

l'inertie de l'eau permet de le faire fonctionner sans coup de bélier sensible, pourvu qu'on le fasse marcher assez vite, ainsi que je l'ai remarqué pour les premiers appareils de mon invention.

Ces principes ont été appliqués pendant plusieurs années à Bardonnèche. M. Noblemaire, ingénieur en chef des Mines, a eu l'obligeance de me communiquer un mémoire qu'il a publié sur ce sujet en 1861. Il aurait été, selon moi, convenable de faire vider la chambre de compression par une oscillation descendante, comme j'ai toujours prescrit de le faire pour les appareils de ce genre. Déjà dans la séance de la Société philomathique du 28 décembre 1839 (voir le journal *l'Institut*, du 16 janvier 1840, n° 516, page 23), j'avais prescrit, pour la fontaine de Héron ou la machine de Schemnitz, d'utiliser l'air comprimé dans le récipient inférieur, « *en vidant l'eau par oscillation, c'est-à-dire en enfonçant d'une* « *certaine quantité le récipient qui la contient en contrebas du* « *niveau de décharge. Cette eau sort par un tuyau recourbé* « *comme dans une machine à colonne oscillante....* »

J'ai rappelé, afin de bien signaler les principes tels que je les avais exposés, l'espèce particulière de *tuyau-soupape* représenté figure 3, planche I, qui permet de faire fonctionner au moyen d'une seule pièce mobile les orifices d'introduction et d'évacuation de l'eau, mais je ne prétends pas que ce régulateur soit le plus convenable pour des circonstances analogues à celles où l'on se trouvait à Bardonnèche. Les ingénieurs sardes ont fait fonctionner, au moyen de vannes cylindriques séparées, les orifices dont il s'agit. Il est important de disposer les choses de manière qu'ils puissent fonctionner le plus vite possible. J'ai signalé pour cela, quand la nature des eaux le permettra, un moyen très simple reposant sur l'emploi des lames courbes concentriques que j'ai présentées à la Société philomatique le 22 juin 1851 et à l'Académie des sciences, le 20 août 1855.

Ces surfaces peuvent être disposées comme des pavillons de trompette rentrant les uns dans les autres autour d'un cône central à génératrice curviligne. Cela permet de diminuer considérablement la résistance de l'eau dans l'espèce de coude annulaire résultant de la disposition d'une vanne cylindrique, soit à la bouche de sortie en aval, soit dans un tuyau dont on veut alternativement boucher la section transversale pour l'introduction du liquide. On peut donc diminuer beaucoup la levée de cette vanne sans augmenter la résistance plus qu'on ne ferait si l'on se croyait obligé de conserver une levée assez grande pour donner des rayons convenables aux courbures destinées à atténuer cette résistance. Cette levée peut être considérablement réduite ainsi, quand même on se contenterait d'employer seulement trois surfaces courbes concentriques.

La pièce sur laquelle fonctionnait à Bardonnèche la vanne cylindrique d'introduction, portait sous sa surface inférieure une sorte de poupe, formée d'une surface conique dont la génératrice était à double courbure, de manière que le bout de tuyau annulaire qui l'enveloppait pût conserver une forme convenable avec une section constante, sans flexion brusque de la veine liquide au-dessous de la vanne cylindrique.

Le mode d'écoulement qui en résultait pour l'introduction de l'eau était d'ailleurs du même genre que celui que j'ai employé pour un tuyau de $0^m,40$ de diamètre dans mes expériences faites en 1842 et 1843, sur le moteur hydraulique à flotteur oscillant (voir ci-dessus, planche VIII, figures 21 et 22, pages 726 et suivantes). Dans ce système, le flotteur était alternativement fixé au haut de sa course il présentait précisément à l'eau, sortant du bief supérieur par la vanne cylindrique, un *tuyau annulaire d'écoulement*, formé de l'intervalle restant entre ses parois et celles du tuyau toujours fixe de l'appareil. La partie inférieure du flotteur en repos pendant cet écoulement présentait aussi précisément une poupe conique. Au-dessus de la vanne cylindrique supposée descendue

il y avait une sorte de proue fixe. Dans le cas où la pureté des eaux l'aurait permis, on aurait pu, au moyen de surfaces courbes concentriques, disposer les choses de manière à diminuer beaucoup la levée de la vanne.

Je passe maintenant à la vanne cylindrique d'évacuation telle qu'elle était construite au mont Cenis. Elle se levait dans l'intérieur d'une sorte de chapeau de fonte qui la recouvrait, et qui était composé d'un bout de tuyau ouvert au bas et fermé par le sommet, au travers duquel passait la tige destinée à la faire fonctionner. Il y avait une cause de perte de force vive résultant de la liberté laissée à l'eau dans cette pièce, et qu'on aurait sans doute pu atténuer en y disposant un cône renversé, surtout si l'état de pureté des eaux avait permis d'y mettre des lames courbes concentriques, l'écoulement au bief d'aval se faisant de bas en haut, au sommet d'un bout de tuyau vertical plongé dans l'eau de ce bief.

Voici en quoi consisterait l'avantage de pouvoir ouvrir très vite cette vanne. Quand la colonne comprimante et refoulante a produit son effet sur l'air dans la chambre de compression, elle descend suivie par l'air extérieur entrant au-dessus d'elle par des soupapes à air. Or, celles-ci peuvent être disposées, de façon à ne point permettre à cet air de ressortir en quantité notable, puisqu'il ne peut alors entrer dans le récipient où la tension devait être d'environ six atmosphères dans cette localité. Par conséquent, si la vanne d'évacuation de l'eau ne se refermait pas aussi vite qu'on devrait le désirer, une partie de l'eau sortie au bief d'aval pourrait rentrer dans la branche de décharge. Mais sa course y serait limitée par la résistance de l'air contenu dans la chambre de compression, produisant alors, jusqu'à un certain point, un effet analogue à celui d'une cloche à plongeur ; et même le commencement de compression de l'air qui en résulterait ne serait point perdu pour l'effet qu'on veut produire.

On conçoit que, si la vanne dont il s'agit tardait trop à se fermer, cela pourrait occasionner des oscillations secondaires

dont il serait facile de se rendre compte. Mais ce qui précède suffit pour montrer que, si la hauteur de la chambre de compression ne dépasse pas, dans des circonstances analogues, certaines limites relativement à la pression atmosphérique, il est évident que, même sans addition d'aucun clapet de retenue, le ressort de l'air offrira un moyen d'avoir le temps de fermer la vanne d'évacuation. De sorte qu'il est, en définitive, intéressant d'étudier surtout les moyens de la faire ouvrir vite. Si le tuyau de décharge n'est pas assez long, il faut qu'elle puisse s'ouvrir très vite pour qu'on puisse bien profiter de l'oscillation descendante.

La vanne cylindrique d'évacuation était à Bardonnèche dans des conditions très différentes de celle d'introduction. Celle-ci pouvait se lever ou se baisser sans qu'on eût à se préoccuper, relativement aux surfaces coniques destinées à empêcher une flexion brusque, de ce que l'eau qu'elle déplaçait devait trouver un passage tout naturellement livré par la colonne liquide. Mais, l'orifice de sortie en aval étant recouvert d'un chapeau, si l'on y avait disposé, pour diminuer la flexion de la veine liquide une surface conique dont le sommet aurait été à sa partie inférieure, la vanne en se levant ou se baissant aurait eu à déplacer de l'eau qui aurait dû passer entre elle et les bords de cette surface.

Si les ingénieurs sardes ne se sont pas préoccupés de ce détail comme pour la vanne d'introduction, c'est sans doute par ce qu'ils ne cherchaient point à utiliser l'oscillation descendante de décharge, d'autant plus qu'ils pouvaient avoir à se préoccuper de difficultés quelconques qui auraient pu résulter de l'état des eaux quand elles étaient troubles. Mais, lorsque les eaux seront assez pures, rien n'empêchera d'employer non seulement cette surface conique, mais des surfaces concentriques, c'est-à-dire disposées, comme je l'ai indiqué ci-dessus, pour diminuer la résistance de l'eau. Je crois inutile d'entrer dans plus de détails sur l'application de ces surfaces dans des circonstances semblables. Il est à peine

nécessaire d'ajouter que l'espace annulaire, qu'il faudrait ménager entre la vanne cylindrique d'évacuation et la surface conique supérieure, n'empêcherait pas d'employer celle-ci avec avantage, d'autant plus que les autres surfaces courbes précitées empêcheraient la veine liquide d'exercer sur l'espace annulaire dont il s'agit, une percussion aussi forte que si elles n'existaient pas.

L'oscillation de vidange serait plus utile à étudier si les chutes motrices étaient moins grandes qu'à Bardonnèche. Il est à peine nécessaire de remarquer que, pour de petites chutes, on ne pourrait avoir au moyen de cette disposition que des pressions assez faibles. Mais alors, surtout quand on voudrait avoir d'assez grandes pressions, et même si l'on n'avait besoin que de machines soufflantes, il serait bien plus simple d'employer l'appareil décrit dans le paragraphe précédent.

Il n'est pas nécessaire, comme le pensaient les ingénieurs qui ont construit cette machine, que la section de la chambre de compression soit égale à celle du tuyau de conduite : j'ai déjà parlé de ce genre de considérations, page 631. On peut, dans des limites assez étendues, augmenter sans inconvénient sérieux, les sections de cette chambre, en évitant d'ailleurs les changements brusques de diamètres. J'ai donné dans la première partie, pages 368 à 374, un essai de calcul pour déterminer la perte de travail résultant de l'échauffement de l'air, perte qui peut être précisément atténuée, au moyen de l'élargissement de la chambre de compression. L'ouvrage officiel sur ce travail, intitulé : Traforo delle Alpi, etc., Turin, 1863, pages 60 et 61, ne paraissait attacher aucune importance quant à la pratique à une cause de perte de force vive indiquée par la nouvelle théorie de la chaleur.

Pour se rendre compte de la cause de déchet qui résulterait d'un trop grand élargissement de la chambre de compression, il faut se rappeler que, si la bouche d'entrée du tuyau de conduite dans cette chambre n'était pas évasée, il y aurait

une perte de force vive, provenant de la vitesse de l'eau passant par cette extrémité. On peut atténuer cette perte en élargissant cet orifice, mais assez graduellement pour que les vitesses varient par degrés assez peu sensibles. On conçoit d'ailleurs que, si le tuyau de conduite a un diamètre trop petit par rapport à celui de la chambre de compression, les vitesses pourront y être assez grandes pour que le travail en frottement qui en résultera soit si considérable, qu'il vaudrait mieux augmenter son diamètre en se débarrassant au reste de difficultés d'exécution et de causes quelconques de perte de force vive provenant des changements de diamètres.

M. de Cuyper, l'éminent directeur de la *Revue universelle de Liége*, alors professeur de mécanique à l'Université de cette ville, inspecteur des études à l'École des mines de Belgique, etc., a publié dans sa Revue, cahier de mars et avril 1859, un mémoire intitulé : « Résumé succinct de diverses « notes sur les machines soufflantes ou à compression d'air « de M. le marquis Anatole de Caligny, publiées avant 1852, « rédigé à l'occasion des relations techniques sur le perce- « ment des Alpes. » L'Académie des sciences de Turin a publié dans son volume pour l'année 1859, un mémoire intitulé : « Notice historique et critique sur les machines à com- « pression d'air du mont Cenis, par le marquis Anatole de « Caligny, correspondant de l'Académie royale des sciences « de Turin. »

Je ne reproduirai pas ici ces deux mémoires qui sont d'ailleurs dans des recueils très connus. Il suffit, en effet, à la rigueur de rappeler les deux notes précitées du 22 juin 1844 et du 8 août 1846, et l'emploi des vannes cylindriques ou tuyaux soupapes dans plusieurs de mes appareils, ayant donné dans cet ouvrage les détails qui peuvent intéresser au point de vue de l'utilité publique.

CONCLUSIONS.

Quand les chutes motrices ne sont pas très grandes, je préfère en général la forme du compresseur pour lequel la force vive s'emmagasine par un écoulement à l'extérieur, avant que l'air commence à être refoulé. Sous cette forme le système est d'une très grande simplicité, d'autant plus qu'on n'a à s'occuper pour l'eau que d'un seul orifice. Ce système aurait pu être appliqué notamment sur le versant français.

Quant aux chutes très grandes, comme celles de Bardonnèche, il a été possible de faire partir la colonne liquide du repos au moment où elle commence à refouler l'air. Sous cette forme le système, tel qu'il a été appliqué à Bardonnèche, est beaucoup moins intéressant au point de vue scientifique. J'ai cependant tenu à faire savoir que j'en avais donné le principe dans la séance de la Société philomathique du 8 août 1846, d'autant plus que j'ai proposé le premier d'appliquer à de très grandes colonnes liquides des vannes annulaires, qui n'avaient été employées en hydrodynamique que pour des turbines.

J'avais depuis longtemps fait fonctionner des colonnes liquides en mouvement dans des tuyaux de conduite très peu résistants et de diamètres bien autrement considérables que tout ce qui avait jamais été proposé pour le bélier hydraulique, même avec des tuyaux très résistants. Or, il est bien à remarquer que les ingénieurs sardes n'avaient pas osé dépasser les diamètres que j'avais moi-même employés, en obtenant un jeu régulier avec ces grandes colonnes liquides.

J'ai indiqué des perfectionnements qu'il eût été convenable, selon moi, de faire aux appareils tels qu'ils les avaient construits. On aurait d'ailleurs pu n'avoir qu'une seule pièce mobile pour l'entrée et la sortie de l'eau.

On lit, page 41, dans un mémoire de M. Sommeiller, pu-

blié en 1857, comme réponse à M. Piatti, qui avait proposé de comprimer l'air au moyen d'une combinaison intéressante du principe de la machine de Schemnitz, une phrase dont voici la traduction textuelle..... « Donc notre compresseur a « pour caractère *essentiel fondamental:* l'emploi de la force « vive de l'eau, qui, si l'on veut la mettre entièrement à « profit, exige que la colonne comprimante soit dans toute « sa longueur, c'est-à-dire depuis la chambre de compression « jusqu'au réservoir alimentaire, d'une section égale, et que « la compression soit directe..... »

On a vu plus haut que cette dernière assertion est beaucoup trop exclusive et que même il vaut mieux, à divers égards, augmenter, dans des limites assez étendues, le diamètre de la chambre de compression.

Des pompes à air mises en mouvement par des roues hydrauliques ont coûté beaucoup moins cher que ces compresseurs à colonnes liquides oscillantes. Mais si l'on avait élargi la chambre de compression dans les limites où cela se pouvait, sans qu'il résultât trop de perte de force vive d'un évasement disposé d'une manière convenable, on aurait eu beaucoup moins de machines et de changements de périodes.

L'application de ce système dépend d'ailleurs de la nature des eaux. M. Noblemaire dit que la marche était extrêmement régulière avec des eaux claires, ou même avec des eaux n'ayant en suspension que des boues ou des sables fins, mais qu'il en était autrement quand elles amenaient avec elles, dans les crues, des matières ligneuses ou filamenteuses très ténues (racines, mousses), que le jeu de la soupape d'admission n'était plus aussi net qu'il aurait dû l'être. Il en résultait des inconvénients qui ne se seraient pas présentés pour la première forme de mon *appareil univalve*, c'est-à-dire n'ayant qu'une seule soupape *annulaire* pour l'introduction et l'évacuation de l'eau. Il est donc bien entendu que je la préfère en général à celle où les sections transversales sont alternativement bouchées. Il y a d'ailleurs lieu de penser que les

difficultés résultant de l'état des eaux auraient été bien atténuées, si l'on avait substitué des soupapes de Cornwall aux vannes cylindriques, telles qu'elles ont été employées. Je reviendrai plus loin sur ce genre de détails.

Quant aux machines soufflantes, on m'a conseillé, comme je l'ai dit dans mon mémoire précité de 1844, de disposer sur la colonne liquide oscillante un flotteur ayant pour but d'empêcher, au besoin, l'air d'être mouillé par cette colonne (1).

Je me suis un peu étendu sur la forme du système tel qu'il a été exécuté par les ingénieurs Sardes. Mais en rappelant que j'avais signalé aussi le principe qu'ils ont appliqué, je dois signaler les avantages de la forme de mon système pour laquelle il n'y a qu'un seul tuyau-soupape fonctionnant de la manière la plus simple possible, un seul orifice servant d'ailleurs à l'introduction et à l'évacuation de l'eau. Si l'on avait laissé un peu d'eau s'écouler préalablement au bief d'aval,

(1) Dans la séance de la Chambre des députés de Turin, du 11 juillet 1862, le rapporteur de la Commission chargée d'examiner les observations faites par plusieurs ingénieurs sur les machines à compression d'air du Mont-Cenis, a rappelé avec bienveillance mon mémoire de 1837, et la grande médaille d'or que Charles-Albert, roi de Sardaigne, m'avait fait l'honneur de me décerner, peu de temps après la publication de ma note précitée de 1844 sur les machines soufflantes ou à compression d'air. Elle porte l'inscription : *Marchioni de Caligny hydraulico egregio.* Elle était accompagnée de la lettre de Monsieur le Comte Solar de la Marguerite, Ministre des affaires étrangères, dont voici la copie :

Secrétairerie d'État pour les affaires étrangères.

Turin, le 31 juillet 1844.

« Monsieur le Marquis,

« Le Roi, mon Auguste Souverain, a fort agréé l'hommage que vous « lui avez fait de quelques-unes de vos productions scientifiques, et, « connaissant le succès avec lequel vous marchez sur les traces de vos « célèbres ancêtres dans la culture des mathématiques, Sa Majesté a saisi « volontiers cette occasion pour vous donner une marque de sa bien- « veillante satisfaction en vous décernant une médaille d'or portant Sa

une vitesse dont la *hauteur due* aurait été très petite par rapport à la chute, aurait fait fonctionner un tuyau-soupape comme pour la forme de l'appareil décrite dans le premier paragraphe de ce chapitre. S'il en était résulté une perte de temps provenant de l'oscillation en retour, comme on aurait pu élargir la chambre de compression dans les limites indiquées ci-dessus, le système aurait été encore très-simplifié. Au lieu des coups de bélier qui pouvaient résulter de ce qu'une soupape ne fonctionnait pas assez vite à Bardonnèche quand les eaux n'étaient pas suffisamment pures, il aurait pu arriver que l'eau ayant le temps de prendre dans ce cas trop de vitesse, aurait donné lieu à quelques périodes dans de mauvaises conditions, mais sans occasionner de rupture.

« Royale effigie. Je m'empresse de remplir les gracieuses intentions
« de Sa Majesté à votre égard, en vous transmettant ci-joint, de sa
« part, la médaille qui vous est destinée, et je vous prie d'agréer en
« même temps, Monsieur le Marquis, les assurances de ma considé-
« ration très distinguée.

« Signé : Solar de la Marguerite. »

Je ne reproduirai pas les témoignages qui me furent donnés dans cette séance par plusieurs membres de la Chambre des députés de Turin. Je transcrirai seulement, à cause d'une reconnaissance officielle de principe, les mots suivants du discours de M. Sella, Correspondant de l'Institut de France, alors Ministre du royaume de Sardaigne :

« ..... Il primo forse che propose di adoperare l'aria compressa per
« traforare delle grandi catene di montagne fu il Colladon di Ginevra.
« Il Caligny aveva proposto degli apparati, onde impiegare l'acqua a
« comprimere quest'aria, traendo partito della forza viva di quest'
« acqua, quando fosse stata posta in moto..... »

Voici la traduction textuelle de ce passage :

« ..... Le premier peut-être qui proposa d'employer l'air comprimé
« à percer les grandes chaînes de montagnes fut Colladon de Genève.
« Caligny avait proposé des appareils, à employer l'eau à comprimer
« cet air, en tirant parti de la force vive de cette eau, quand elle au-
« rait été mise en mouvement..... »

NOTES

SUR

DIVERSES APPLICATIONS DES SOUPAPES ANNULAIRES

Extraites du Bulletin de la Société philomathique.

Ces notes peuvent être présentées ici, comme des pièces justificatives, relativement à ce que j'ai proposé à diverses époques pour l'emploi des vannes annulaires. Elles ne sont pas d'ailleurs sans intérêt à cause de leur application à différentes machines hydrauliques et des recherches historiques auxquelles elles ont donné lieu.

Séance du 28 *février* 1846, *Journal l'*Institut.

«M. de Caligny communique des remarques sur la généralité des applications dont est susceptible la disposition d'une soupape annulaire, qu'il a depuis longtemps communiquée à la société comme un moyen d'éviter toutes les chances de coups de bélier dans le mouvement des grandes colonnes liquides, parce qu'elle ne ferme jamais les sections transversales des tuyaux.

« On a plusieurs fois proposé, peut-être avant moi-même, d'employer la force vive de l'eau d'une écluse de navigation soit à relever une partie de cette eau à des niveaux plus élevés, soit à puiser de l'eau dans le bief inférieur. Cette idée est trop naturelle pour avoir aucun mérite(1). Mais elle ne contient que l'énoncé d'un problème sans en offrir la solution qui ne pouvait être obtenue

(1) Voir, p. 599 et suivantes, les recherches historiques sur ce sujet, faites depuis la publication de cette note.

que par une application de la soupape annulaire, analogue à l'une de celles qui ont été indiquées, dans les séances des 30 novembre et 14 décembre 1844, et dans la séance du 19 février 1842. J'avais déjà décrit et dessiné mon idée principale sur cette soupape dans un mémoire présenté à l'Académie des sciences en 1837, et qui doit être publié dans le *Recueil des savants étrangers*. Ce mémoire contenant des matières assez variées, les commissaires ne s'occupèrent pas spécialement de ce point particulier. Je dois donc rappeler que, depuis cette époque, M. Poncelet m'a emprunté cette idée dans un rapport du 19 février 1845; il m'a cité en l'honorant ainsi de son suffrage et la présentant comme applicable à l'appareil dont il s'occupait alors. (Voir aussi le compte-rendu de la séance du 4 janvier 1845.)

« M. Jappelli a présenté à l'Académie des sciences, en 1835, une ingénieuse pompe qui a été l'objet d'un rapport de M. Navier, inséré avec la figure dans les *Annales des ponts et chaussées*, second semestre de 1836, auxquelles je renvoie pour abréger. Il suffit seulement de remarquer ici que cet appareil à flotteur contient une idée intéressante, consistant en ce que le *flotteur refoulant* est alternativement rempli de l'eau d'un bief séparé, par un siphon renversé, le long de la paroi verticale duquel il glisse et qui communique avec ce bief par son autre extrémité, de sorte que dans le refoulement on n'a à vaincre que l'inertie de l'eau par un véritable appareil à niveau constant, tandis que dans l'autre opération la résistance à vaincre est d'ailleurs *constante*.

« M. Navier a comparé cet appareil à une pompe foulante dont le piston aurait un frottement d'une autre nature, tandis que dans une pompe foulante la résistance est *variable*, pour les faibles hauteurs de refoulement analogues à celles dont s'occupait M. Jappelli : il y a bien plus d'analogie de principes entre cet appareil et la pompe aussi à *double compartiment*, décrite dans les ouvrages de Muschembroeck, sous le nom de Jean Paauw, qui lui en avait communiqué un modèle (Voyez *Cours de physique*, tome III, page 163, planche 56, figure 6, traduction de Sigaud de Lafond, 1769, in-4°). Dans cette dernière pompe le piston est aussi formé d'une caisse mobile glissant alternativement le long d'un tuyau qui y pénètre par dessous. Mais ce n'est point la caisse mobile qui est alternativement remplie par l'eau du bief supérieur, c'est la caisse enveloppante *fixe*. Dans la pompe de Paauw, il y a au moins une des soupapes attachée à la caisse mobile, tandis que dans la pompe décrite par M. Jappelli, elles sont l'une et l'autre attachées à la caisse enve-

loppante fixe, ce qui est plus simple ; mais dans les deux machines le principe du niveau constant repose sur celui de l'abandon alternatif d'une des capacités par de l'eau du bief supérieur (1). La pompe décrite par M. Jappelli a été réclamée par M. l'ingénieur Borchard, le 15 février 1836, pour la personne qui, de 1807 à 1809, remplissait les fonctions de secrétaire perpétuel de la Société d'émulation de Marseille. On voit au reste qu'en général les principes de l'hydrostatique sont, comme j'ai eu et j'aurai plus d'une fois l'occasion de le remarquer, bien plus anciens qu'on ne le pense. C'est ainsi qu'en 1809 il y eut une discussion de priorité relativement à l'emploi comme moteur d'un piston de machine à colonne d'eau, disposé de manière à fonctionner verticalement et avec une force constante, en remontant alternativement contre la colonne motrice, alimentée cependant par un niveau constant. Or, on trouve dans le tome V des *Transactions of the Society for the encouragement of the arts and sciences* qu'en 1765 Smeaton en avait vu fonctionner avec succès une de l'invention de Westgarth, bien mieux disposée à certains égards, et pouvant même fonctionner en partie par l'action motrice de l'aspiration d'une colonne verticale inférieure au récepteur, ce qui passe aussi aujourd'hui pour quelque chose de bien nouveau.

. . . .

(V. pour un développement de ce genre d'idées les pages 883 à 885 et la note page 885.)

« Gueyniveau a depuis longtemps remarqué dans son *Essai sur la science des machines,* qu'en renversant une pompe on fait un récepteur hydraulique. Cela est évident pour les deux anciens appareils objet de cette communication. Mais alors il faut des soupapes susceptibles de garder l'eau également bien dans les deux sens. Cette raison est sans doute celle pour laquelle M. Jappelli ne l'a point remarqué, si toutefois il ne l'a pas dit dans son mémoire ma-

(1) « Pour bien comprendre cette note, il est indispensable de connaître les figures qui y sont rappelées et qui ont été communiquées à la société. La pompe de Paauw est intéressante à cause de son principe ; mais les dimensions de la caisse mobile ne sont pas assez grandes dans la figure de Muschembroeck pour qu'on voie bien le but de l'auteur. Au reste, si ce gence d'appareils diminue le frottement entre corps solides, il augmente à certains égards le frottement des liquides et la perte de force vive provenant des évasements introduits dans le système. »

nuscrit italien, qui doit être inséré dans le *Recueil des savants étrangers*. Or, la difficulté dont il s'agit disparaît, du moins pour l'appareil de M. Jappelli, si l'on emploie les soupapes annulaires dont j'ai parlé. En effet, si l'on jette les yeux sur la figure que j'ai rappelée, on verra qu'alors il suffira, pour transformer la pompe en *récepteur*, de supposer que le bief inférieur devienne le bief supérieur, celui qui recevra directement les eaux de la source motrice. L'emploi de ces soupapes ou tuyaux dans divers appareils n'exige pas qu'on perde à chaque période une quantité d'eau analogue à celle qui semble au premier aperçu devoir être abandonnée par leur capacité, une partie de cette capacité pouvant être sans inconvénient occupée au besoin par un corps proéminent dont les dimensions seront réglées de manière à ne pas intercepter le *passage utile*, sans donner lieu à des coups de bélier.

« Si j'ai fait les remarques précédentes sur la généralité des applications du tuyau soupape même aux machines qui semblent reposer le plus exclusivement sur les principes de *l'hydrostatique*, on doit comprendre, d'après ce qui a été dit plus haut, que mon but est de coordonner la science, sans avoir l'intention de multiplier ce genre de machines. En effet, pour peu que l'on veuille débiter des quantités d'eau considérables, il est facile de voir qu'on rencontrerait ainsi les inconvénients inséparables des masses de grandes dimensions, destinées à marcher lentement. Or, on s'en débarrassera en diminuant d'ailleurs de moitié le nombre des soupapes, réduites à une seule, quand on laissera au contraire la vitesse d'une colonne liquide se développer librement d'abord sous un piston qui, par des moyens que j'ai indiqués depuis longtemps, sera aspiré à une époque voulue comme le piston d'une machine à vapeur atmosphérique, et relevé au besoin par un contrepoids, si même il ne se relève point par le simple jeu du système. » (Voir ci-dessus, page 673 et suivantes.)

Séance du 18 décembre 1858.

« M. de Caligny a présenté dans cette séance une note sur une combinaison de la soupape de Cornwall, avec le tiroir dont il avait entretenu la Société, le 20 juillet 1839.....

«..... Dans les expériences répétées à l'Ecole des mines en 1837, devant une commission de l'Académie des sciences, M. de Caligny mettait alternativement le tuyau vertical d'une de ses machines hydrauliques en communication avec un tuyau de conduite dé-

bouchant par l'autre extrémité dans la prise d'eau, et avec un tuyau de décharge. Ces deux derniers tuyaux étant horizontaux, l'un était bouché par le tiroir, quand l'autre était ouvert..... (Voir, planche I, figure 3, page 709, etc.)

«..... M. de Caligny rappelle qu'il a construit des tiroirs de ce genre, en disposant, aux hauteurs convenables, des pistons annulaires, attachés extérieurement aux tiroirs. Mais les moyens de construction ayant été très perfectionnés depuis l'époque où il présenta ce tiroir, il croit pouvoir aujourd'hui proposer une modification, évitant toute espèce de frottement du tiroir contre des corps solides, et sur laquelle il n'a peut-être pas assez insisté dans ses premières communications verbales, à cause des difficultés de construction qui pouvaient exister encore à cette époque déjà ancienne.

« Il propose, au lieu d'employer des pistons annulaires extérieurs avec garniture, de faire ces pistons entièrement métalliques, fondus tout d'une pièce avec le tiroir, et de tailler ces pistons par dessus et par dessous, de manière qu'ils puissent appliquer alternativement une surface conique sur un siège annulaire fixe taillé convenablement. Le mode de fermeture et les ajustages seront parfaitement analogues à ceux des soupapes circulaires en usage.

« La difficulté pratique consiste en ce que plusieurs de ces pièces annulaires, fondues avec le tiroir, devront en même temps porter sur plusieurs autres pièces annulaires, ou sièges fixés au bout de tuyau fixe ou corps de pompe, dans lequel joue le tiroir, et en ce que la fermeture devra se faire convenablement, non seulement quand le tiroir sera à l'une des extrémités de sa course, mais quand il sera à l'autre extrémité, les faces opposées de ses pièces annulaires extérieures devant s'appuyer contre les sièges fixes. Mais avec une bonne exécution, l'auteur fait observer que ce moyen évite toute espèce de frottement du tiroir, contre des corps solides, sauf celui des guides, et celui qui pourrait résulter des herbes dans les circonstances où il n'y aurait pas moyen de s'en débarrasser; qu'il permet d'ailleurs de profiter de l'extrême précision que le principe de la machine à colonne d'eau lui a permis de donner au jeu du tiroir rappelé au commencement de cette note, par le mode d'action alternative des colonnes d'eau sur le fond du tiroir. Dans les expériences répétées à l'Ecole des mines en 1837, c'était un contrepoids qui relevait le tiroir en temps utile. L'auteur rappelle, qu'au lieu d'un contrepoids solide, on peut employer un *contrepoids liquide*; c'est-à-dire, soit une colonne d'eau, dans un

tube recourbé, disposé au-dessous du corps de pompe, dans lequel joue le tiroir, soit tout simplement la pression de l'eau du bief d'aval, au-dessous du tiroir. Les oscillations seraient alors combinées, ainsi qu'il l'a expliqué depuis longtemps à la Société, et l'a d'ailleurs rappelé d'une manière succincte dans sa dernière communication sur les machines soufflantes ou à compression d'air, auxquelles la disposition, objet de cette note, peut aussi être appliquée. La résistance de l'eau au coude brusque de ce tiroir pourra d'ailleurs être atténuée au moyen du système de lames courbes concentriques rappelé dans la dernière séance..... »

Les moyens signalés pour éviter le frottement dans cette espèce de tiroir peuvent être appliqués à une autre espèce de tiroir à piston, indiqués planche VIII, figure 18, il est bien entendu que, dans l'un et l'autre cas, il sera prudent de garnir les sièges fixes de cuir ou de caoutchouc.

Séance du 16 *juin* 1849.

« J'ai communiqué à la Société, en 1848, des expériences sur un moteur hydraulique à mouvement alternatif et à succion, dans lequel un piston moteur est alternativement *aspiré*, au moyen du mouvement acquis, d'une colonne liquide dans un tuyau disposé au dessous (Voir page 672 et suivantes). Il est à remarquer que, si l'on veut s'en servir pour faire marcher une pompe, qui élève l'eau moins haut qu'une colonne d'eau soulevée par l'atmosphère dans le vide barométrique, une des faces du *piston aspiré* peut servir de piston élévatoire. Si, par exemple, le piston est employé en descendant à tendre un ressort, celui-ci, en le relevant, peut soulever une colonne liquide qui s'est introduite au-dessus de lui par une soupape, pendant le mouvement en sens contraire. Le piston peut aussi être employé en descendant à dilater l'air d'un réservoir, de manière à rendre sa pression moindre que celle de l'air atmosphérique..... »

Ces derniers mots contiennent l'indication d'une espèce de ressort à air dilaté. Dans l'appareil que je viens de rappeler, il est convenable que la résistance à vaincre offre le moins d'inertie possible. Aussi, c'est après avoir montré qu'il pouvait d'abord agir sur un ressort que j'ajoutais :

« J'ai déjà eu occasion de remarquer les propriétés de l'inertie des longues colonnes liquides, considérées comme emmagasinant la force vive à la manière d'un volant. Quand on emploiera ce mo-

teur hydraulique à faire marcher une pompe foulante, dont la co lonne montante aura un développement suffisant, il ne sera pas indispensable que cette pompe ait deux soupapes. On pourra, dans certains cas, supprimer la soupape destinée à empêcher l'eau de retomber. On conçoit, en effet, que si la pression du piston de la pompe foulante est assez grande par rapport au poids d'une colonne d'eau verticale, ayant le diamètre du tuyau montant et la hauteur de ce tuyau, pendant que le piston ne pressera pas la colonne montante, celle-ci n'aura pas le temps d'éteindre entièrement la vitesse qui lui a été imprimée. Or, on peut disposer le rapport des diamètres des deux pistons de manière à avoir la pression voulue sur l'unité de surface de celui de la pompe foulante. »

Application des soupapes annulaires aux machines à colonne d'eau et à pistons pleins fonctionnant sous de petites chutes.

Le 17 septembre 1849 j'ai présenté à l'Académie des sciences un Mémoire intitulé : *Considérations nouvelles sur les machines à mouvement alternatif et à niveaux constants applicables aux chutes motrices d'une petite hauteur*. L'emploi des soupapes annulaires permet de modifier d'une manière intéressante les machines dites à colonne d'eau pour le cas particulier dont il s'agit, quand on n'a besoin que de mouvements d'une certaine lenteur. Je proposais de mettre le piston au-dessous du niveau de l'eau du bief d'aval avec laquelle sa partie inférieure serait toujours en communication. Les deux soupapes annulaires d'introduction et d'évacuation de l'eau motrice seraient l'une et l'autre plus élevées que ce piston. La première se fermerait en s'appuyant par le rebord de son sommet sur un disque toujours plongé dans l'eau du bief d'amont. La seconde intercepterait alternativement le passage, en se levant pour s'appuyer de bas en haut contre une couronne fixe.

Je suppose qu'on lève la soupape d'amont, l'eau motrice

descendra dans le système en refoulant le piston de haut en bas. Quand elle sera fermée, celle d'évacuation s'ouvrira, et comme celle-ci sera toujours plongée dans l'eau du bief d'aval, le liquide contenu au-dessus du niveau de ce dernier se trouvera au besoin soutenu par la pression atmosphérique. De sorte que la quantité d'eau occupant l'espace abandonné par le piston passera facilement au bief inférieur, si le piston est relevé par un contrepoids, sans qu'on ait à se préoccuper de la quantité d'eau contenue dans la soupape annulaire supérieure. Il n'est donc pas même nécessaire que celle-ci soit plongée au-dessous du niveau d'aval, pouvant même être près de celui d'amont, pourvu que cela n'empêche pas ce dernier de rester assez sensiblement constant, d'autant plus que l'air ne doit pas entrer dans le système.

Il est à remarquer que le mouvement acquis de bas en haut par le piston dans les appareils de ce genre, quand la soupape d'introduction s'ouvre, n'aurait pas les mêmes inconvénients que si le liquide, rentrant alors au bief d'amont, n'avait point la liberté de se répandre, et, si l'on peut s'exprimer ainsi, de *rayonner* de tous les côtés.

On sait que, pour les petites chutes motrices, on a proposé des machines dites à *piston creux*, c'est-à-dire dont la soupape d'introduction est dans le piston, ce qui est une cause évidente d'étranglement. Or, on peut avoir des orifices de sections beaucoup plus considérables au moyen de soupapes annulaires et d'un piston plein (1).

(1) Je n'entrerai pas ici dans les détails d'exécution voulant seulement appeler l'attention sur quelques principes sans y attacher d'ailleurs autant d'importance qu'à ceux qui ont été signalés dans cet ouvrage pour des pistons alternativement aspirés. Il suffit au reste de rappeler notamment le curieux balancier hydraulique employé par Denisart et de La Deuille, les inventeurs de la machine à colonne d'eau, et dans lequel une même masse de liquide part alternativement d'une extrémité à l'autre de ce balancier, qui par cette raison achève sa course de lui-même quand une de ses extrémités a été relevée au-dessus du plan horizontal, de sorte qu'il peut agir avec précision à l'instant

On peut faire fonctionner deux pistons marchant en sens opposés au moyen de deux soupapes annulaires, l'une et l'autre étant au-dessus du piston inférieur et au-dessous du piston supérieur. Je suppose la soupape d'évacuation ouverte, le piston supérieur étant toujours plongé dans le bief d'amont avec lequel il communique par une de ses bases. Il descendra en vertu de la pression qui s'exercera au-dessus de lui et de l'aspiration de la colonne d'eau qui est au-dessous de lui. A cette époque, si le piston inférieur est descendu, il remontera au moyen d'un contrepoids parce qu'il sera en communication des deux côtés avec l'eau du bief inférieur.

Lorsqu'on fermera la soupape d'évacuation et qu'on ouvrira celle d'amont, l'eau du bief supérieur poussera de haut en bas le piston inférieur, et le piston supérieur se trouvant des deux côtés en communication avec l'eau du bief d'amont, sera relevé par un contrepoids. Il est bien à remarquer que ces diverses manœuvres supposent les vitesses des pistons assez petites pour que les pressions, qui doivent alternativement permettre de les relever, puissent en temps utile se contrebalancer d'une manière convenable (1).

voulu pour ouvrir ou fermer une soupape. Ce balancier mis en mouvement par la tige d'un piston, pouvant être disposé beaucoup au-dessus d'un corps de pompe, jouit de la propriété de pouvoir fournir des courses considérables, même au moyen d'une petite chute, à cause des points d'application que l'on choisit pour la tige qui peut le faire monter, en lui laissant la liberté d'achever sa course, étant abandonné à lui-même.

(1) Je dois dire que l'idée de faire contrebalancer alternativement des pressions pour permettre à des pistons de se relever, a été depuis longtemps signalée par Westgarth pour des moteurs hydrauliques à niveaux constants. Il est bien entendu que ce qui vient d'être dit sur ces combinaisons de pistons pleins a principalement pour but de nouvelles applications des soupapes annulaires. Mais si les principes de l'hydrodynamique sont en général plus nouveaux que ceux de l'hydrostatique, les combinaisons nouvelles de cette dernière doivent aussi être signalées. Les pages 879 et 880 pourraient occasionner des méprises ayant dû être reproduites textuellement.

APPAREIL A ÉLEVER L'EAU

ET

A FAIRE DES ÉPUISEMENTS

AU MOYEN DES VAGUES

J'ai annoncé, pages 272 et suivantes de la première partie, que je donnerais des détails sur les expériences dont il s'agit. Elles ont été faites sur le canal dont la description a été donnée, pages 292 et suivantes. Je vais reproduire le plus textuellement possible une Note publiée dans le Compte rendu de la séance de l'Académie des sciences du 3 novembre 1879.

Cet appareil a pour but : 1° d'élever de l'eau sans coup de bélier et *sans aucune pièce quelconque mobile* à des hauteurs considérables, par rapport à celles des vagues ; 2° de faire des épuisements à d'assez grandes profondeurs, relativement à celles du creux des vagues, quand on ajoute un clapet au système.

Il se compose d'un siphon renversé à deux branches horizontales, dont une, qui est convenablement évasée, reçoit alternativement le choc de la vague et la pression latérale occasionnée par son intumescence. La forme générale peut être représentée sans figure, par celle d'une sorte de grande S, qui serait posée horizontalement. La branche verticale, tournée vers le haut, serait suffisamment prolongée ; la branche verticale, dirigée vers le bas, serait supprimée et remplacée, par une branche horizontale dont l'extrémité serait convenablement évasée.

Je suppose, pour faciliter l'explication, surtout à cause de la manière dont les expériences ont été faites, que le liquide soit encore en repos et que le niveau soit au-dessus de cette branche évasée, seulement de la quantité nécessaire pour que les vagues ne découvrent pas son arête supérieure. La première vague qui arrive fait monter l'eau dans la branche verticale prolongée, comme je l'ai dit ci-dessus. Cette ascension, d'abord assez petite (1), est suivie d'une oscillation en retour coordonnée relativement à l'époque où le creux de la vague se trouve au-dessus de la bouche évasée, de manière que sa descente est facilitée par la présence de ce creux. La vague suivante trouve la colonne liquide dans le tuyau vertical précité au-dessous du niveau primitif de l'eau tranquille et la fait monter, par conséquent, plus haut que la première fois. Elle redescend ensuite, par une oscillation en retour, plus bas qu'elle ne l'avait déjà fait, et la troisième vague la fait monter plus haut que la deuxième fois. La hauteur des oscillations augmente ainsi de plus en plus, jusqu'à ce que l'eau jaillisse par le sommet du tube d'ascension précité. L'appareil verse ensuite alternativement de l'eau par ce sommet tant que les vagues sont suffisamment régulières. Il est bien à remarquer que, dans ce système, le diamètre du tuyau a pu être constant, sauf l'évasement dont j'ai parlé. Il n'y a pas de coup de bélier proprement dit, mais plutôt une simple percussion de veine liquide (puisque la masse en mouvement qui frappe la bouche évasée n'est pas enfermée dans un tuyau), et une pression latérale, causée par l'intumescence de la vague. On verra plus loin d'après quels principes l'amplitude des oscillations est limitée.

Il ne paraît pas sans quelque intérêt de remarquer que

(1) Cet appareil permet de constater que les premières ondes produites par un mouvement de va-et-vient vertical à une extrémité du canal sont bien moindres que celles qui les suivent, le *régime* étant ensuite établi parce que les ondes se brisent sur un plan incliné à l'autre extrémité comme je l'ai dit dans la première partie.

cette combinaison, *sans aucune pièce quelconque mobile,* est assez simple pour qu'il ne soit pas impossible de la trouver dans la nature, de sorte que c'est une de celles qui peuvent servir à l'explication de quelques fontaines intermittentes.

Lorsque, au lieu d'élever de l'eau, on veut se servir de cet appareil pour faire des épuisements, d'un marais par exemple, il suffit d'y ajouter un clapet de retenue, établissant alternativement une communication avec l'eau qu'on veut épuiser. Il est bien entendu que, dans ce cas, l'eau dont les ondulations servent de force motrice à l'appareil doit être convenablement séparée, par un mur de cloison, de l'eau à épuiser.

Je n'entre pas ici dans le détail de la manière dont les choses doivent être disposées, pour diverses circonstances; mon but est seulement de bien exposer les principes. Pour que cet appareil fonctionne dans de bonnes conditions, il faut, du moins jusqu'à présent, que sa longueur développée soit convenablement réglée, relativement à la longueur ordinaire des vagues. Ainsi, lorsqu'elles étaient produites dans le canal factice par une machine à vapeur, si la vitesse des périodes augmentait trop, les oscillations dans le tube d'ascension devenaient insignifiantes, et, à proprement parler, l'appareil ne marchait plus. Aussi, la plupart des expériences ont été faites, les vagues étant produites par un ouvrier qui soulevait alternativement une pièce de bois à l'une des extrémités du canal.

La forme sinueuse indiquée ci-dessus pour le tuyau de conduite qui précède le tube d'ascension est très importante pour permettre de donner de grandes amplitudes, relativement à la hauteur des ondes, aux oscillations, soit au-dessus soit au-dessous du niveau de l'eau tranquille. J'avais d'abord essayé de donner seulement au système une forme pouvant être représentée sans figure par une sorte de grande L; mais, dans ce cas, la bouche évasée qui recevait l'action des vagues étant beaucoup au-dessous du niveau de l'eau tran-

quille, les effets étaient très différents. Cela limitait les épuisements à une profondeur à peu près la même que celle du creux des vagues. L'expérience a vérifié combien il était essentiel, pour obtenir des amplitudes beaucoup plus grandes, de recevoir l'action des vagues *le plus près possible* du niveau de l'eau en repos stable. Le mouvement des vagues est d'autant plus fort qu'on s'approche des régions supérieures ; et il y a une remarque intéressante à faire sur la manière dont la pression latérale de l'intumescence s'exerce dans ces régions.

J'ai fait depuis longtemps des expériences sur le mode de transmission des pressions, dans un tuyau de conduite débouché subitement par une extrémité, l'autre se plongeant librement dans un réservoir rempli d'eau. Les pressions étant d'abord employées à vaincre l'inertie de la colonne liquide sont, aux premiers instants, très peu sensibles à l'extrémité qu'on débouche. Il en résulte que, dans les mouvements alternatifs, la pression causée par une intumescence s'exerce d'une manière bien différente près de la surface de l'eau qu'à une assez grande profondeur, et, en effet, le mouvement ondulatoire est plus fort près de la surface qu'au fond du canal.

Pour recevoir convenablement l'action des vagues sur l'appareil dont il s'agit, il ne semble pas bien utile, d'après les expériences faites sur le canal factice, que la bouche évasée qui reçoit cette action soit très large par rapport à la section du tuyau. Cet évasement a plutôt pour but de présenter un ajutage, utile pendant l'oscillation en retour pour diminuer la perte de force vive à cette époque, et la contraction de la veine liquide dans l'autre sens du mouvement.

Il est essentiel, pour pouvoir profiter de ce système, d'en simplifier le plus possible la construction, car, s'il n'était pas d'une extrême simplicité, il vaudrait mieux employer la force du vent qui produit les vagues. Or, le moyen que j'ai proposé, pour diminuer la perte de force vive dans les ajutages divergents, est immédiatement applicable dans cette circonstance. J'ai même fait, à cette occasion, des expériences par

lesquelles j'ai vérifié l'efficacité de ce moyen (voir pages 341 et suivantes). On peut ainsi modifier la longueur développée de ce système, de manière à la mettre en rapport convenable avec la longueur des vagues, observée le plus ordinairement dans la localité où l'on aura à construire un appareil de ce genre.

On ne doit pas se dissimuler que, les vagues étant assez variables, il ne faudra pas compter dans la pratique sur le maximum de hauteur ou de profondeur qu'elles pourront faire atteindre dans le tuyau d'ascension. Enfin, cet appareil ne pourra être utilisé, en général, que dans les mers sans flux et reflux trop sensibles ou dans les grands lacs.

Il semble au premier aperçu que, si les vagues étaient toutes d'une même hauteur et qu'il n'y eût pas de frottement, ni de cause de résistance passive, on pourrait théoriquement obtenir des oscillations d'une amplitude indéfinie. Cette indication théorique ne pourrait être vraie que jusqu'à un certain point, quand même le siphon renversé s'enfoncerait dans un puits à de très grandes profondeurs, parce qu'il faut, pour que les oscillations croissent successivement jusqu'à des hauteurs très grandes, par rapport à celle des vagues, que ces oscillations se combinent d'une manière convenable, quant à leur durée, avec la durée du passage d'une intumescence de la vague au creux de cette même vague. Or, on conçoit que, si l'on enfonce le siphon renversé à de trop grandes profondeurs, cela change les conditions de durée des oscillations de la colonne liquide, dont la longueur développée peut ainsi être modifiée d'une manière essentielle.

Abstraction faite des applications que pourra avoir ce système, il est intéressant d'en conserver la trace, pour montrer de quelle manière les amplitudes des oscillations ont pu être successivement augmentées, en vertu des principes sur les oscillations accumulées, qui ont été exposés dans cet ouvrage, pages 700 et suivantes.

Je viens de retrouver un dessin de l'appareil (V. fig. 29, pl. VIII), j'en indique seulement la forme générale pour le

cas où il élève de l'eau sans pièce mobile. Quant à la soupape d'introduction de l'eau à épuiser, elle avait été disposée dans le modèle fonctionnant de sections rectangulaires d'une manière qui n'était pas la plus rationnelle, à cause des difficultés d'exécution résultant des dimensions du canal factice. Je n'en donnerai donc pas ici le détail. NN est le niveau de l'eau supposée en repos. BE est un tuyau de conduite toujours rempli d'eau. AB est un entonnoir dont les sections sont en général plus larges que hautes, selon la manière dont se comportent les vagues les plus ordinaires dans la localité choisie pour l'application de ce système. L'élargissement peut commencer aussi loin de A qu'on le juge convenable relativement aux dimensions de ces vagues comme on l'expliquera plus loin. EF est un tuyau d'ascension, vertical ou incliné, dans lequel se produisent des oscillations successivement croissantes jusqu'à ce qu'elles jettent de l'eau par le sommet F. Alors la machine est amorcée et marche assez régulièrement tant que les dimensions des vagues ne varient pas trop. Quand l'eau cesse de verser par le sommet F, la même série d'effets recommence, car on ne doit pas compter que la marche soit longtemps régulière. Lorsque la machine sert à faire des épuisements, la soupape d'introduction de l'eau à épuiser empêche celle-ci de retourner dans le puisard d'où bientôt on recommence à en tirer.

L'emploi des lames qui diminuent les résistances passives dans les ajutages divergents, a permis de modifier les dimensions de ces ajutages, pour l'appareil dont il s'agit, quand il a été essayé à Cherbourg en 1879. Après mon départ M. Bertin a eu l'obligeance de constater sur ce modèle, que l'emploi de ces lames permet d'augmenter d'environ un cinquième la profondeur à laquelle on peut faire des épuisements avec des vagues d'une hauteur donnée.

Quant à la forme sinueuse du tuyau de conduite dont ce modèle donne un exemple, elle dépend de la disposition du rivage et des conditions à remplir quand elle sera appliquée.

On conçoit que, si la plage est inclinée selon certaines lois, il est possible qu'un appareil dont l'axe aurait une forme analogue à celle d'une grande L fût plus convenable, s'il ne s'agissait que de recevoir la percussion des vagues assez près de la surface du liquide en ondulation. Mais l'idée d'enfoncer le tube vertical dans un puits permet d'augmenter les amplitudes des oscillations, et il est d'ailleurs essentiel, pour faire des épuisements, que la colonne liquide puisse descendre beaucoup plus bas que la bouche qui reçoit l'action des vagues.

Avant d'avoir construit le modèle dont je viens de parler j'avais publié en 1859, dans le *Journal de Mathématiques* de M. Liouville et dans la *Revue universelle* de Liége, un mémoire où je reproduisais comme pièce justificative ma note du 17 mai 1851 rappelée p. 273. Il n'est pas nécessaire, après avoir donné divers détails dans cet ouvrage, de transcrire ici ce mémoire qu'on pourrait d'ailleurs consulter au besoin.

Je rappellerai qu'aux effets immédiats des dénivellations dont je viens de parler, il faut joindre ceux de la diminution des pressions moyennes résultant du mouvement oscillatoire sur lesquels je me suis étendu pages 158 à 181. Quant au choix de la position du clapet devant mettre alternativement l'appareil en communication avec l'eau à épuiser, il paraît que le plus convenable est en général de préférer la partie intérieure du coude qui réunit le tube vertical au tuyau de conduite, je veux parler de la partie du coude dont la courbure est la moindre. La force centrifuge résultant du mouvement de la colonne liquide peut aider à faire entrer l'eau dans le système. Si, d'ailleurs, on est obligé de faire un coude trop brusque occasionnant une véritable contraction de la veine liquide, cet effet, qui est une cause de perte de force vive, pourra, jusqu'à un certain point, favoriser l'entrée de l'eau à épuiser.

Il est utile de régler les oscillations de la colonne liquide de manière à mettre leurs durées en rapports convenables avec celles des oscillations des vagues les plus ordinaires dans

la localité où l'on se trouvera. Or, on peut être gêné par la disposition des lieux pour déterminer la longueur développée du tuyau de conduite relativement à ces conditions. Il est donc intéressant de rappeler qu'on peut diminuer beaucoup la durée des oscillations, en augmentant graduellement les diamètres du tuyau de conduite, qu'on pourra même commencer à élargir à partir de sa jonction avec le tube vertical. L'appareil n'en sera que mieux disposé à certains égards, pour recevoir la percussion des vagues.

Ainsi que je l'ai remarqué relativement aux fontaines intermittentes sous-marines, il y aurait des observations intéressantes à faire sur l'emploi de l'inertie d'un long tuyau de conduite qui amènerait l'eau à épuiser. Mais, dans la pratique, il sera nécessaire d'employer une soupape de retenue. De sorte que si l'on était obligé de se servir d'un long tuyau de conduite pour amener l'eau, d'un marais par exemple, il vaudrait mieux faire déboucher ce tuyau dans un puisard que de l'adapter immédiatement à l'appareil.

Il n'est pas sans quelque intérêt de remarquer, surtout pour les premières applications de ce système, que si l'on s'était trompé quant aux durées des oscillations sur les dimensions du tuyau de conduite, on pourrait modifier ces durées en réglant convenablement les sections du tube vertical. Or on pourrait introduire dans celui-ci des pièces fixes analogues à celles dont j'ai signalé l'emploi pour l'appareil élévatoire à tube oscillant. Ce serait d'ailleurs dans sa partie d'amont qu'elle gênerait le moins le mouvement de l'eau. Il faut, en effet, si le coude n'est pas assez arrondi, que la veine liquide ait le plus de liberté possible, d'après ce qui a été dit dans cet ouvrage sur la manière dont elle s'écrase dans les coudes. On conçoit, relativement au mode d'introduction de l'eau précité que la pièce taillée inférieurement en biseau ne devra point descendre trop bas. Si l'on veut diminuer la durée de chaque période, cette pièce n'a d'influence importante, sous ce rapport, qu'en ce qu'elle est alternativement découverte.

Ce système n'est pas seulement applicable aux circonstances où l'on a à faire des épuisements, mais aussi aux cas où l'on n'aurait qu'à déplacer de l'eau, par exemple pour assainir un port.

Quant à l'appareil considéré comme ayant pour but d'élever de l'eau sans faire des épuisements, il n'est pas sans quelque intérêt de remarquer que, si l'on a besoin de l'élever à des hauteurs différentes, par exemple pour remplir un réservoir, on peut disposer sur le tube vertical des soupapes permettant de varier les élévations, quand on aura des vagues plus ou moins puissantes. Il ne faut pas conclure de mes expressions que le tube d'ascension doive être nécessairement vertical. Il y a évidemment des détails à étudier par expérience.

Principes relatifs à divers appareils pour les épuisements.

J'ai indiqué, pages 768 à 771, un moyen de faire des épuisements, en tirant alternativement de l'eau du réservoir d'amont par une soupape annulaire, la colonne liquide oscillant dans la plus grosse branche d'un siphon au-dessus et au-dessous de l'eau à épuiser. Je n'ai pas donné assez de détails sur les conditions mentionnées à la page 666, qui peuvent permettre de supprimer le clapet d'introduction de l'eau à épuiser, dont le tuyau de conduite est censé déboucher toujours au-dessous du niveau de l'eau dans la grosse branche du siphon.

Supposons d'abord que ce clapet soit conservé. Si le niveau de l'eau qu'il s'agit d'introduire par ce clapet est assez près du sommet de la grosse branche, relativement à la course de l'oscillation dans celle-ci, l'eau baissera alternativement au-dessous de celle qu'il faut épuiser beaucoup plus qu'elle

ne montera au dessus. Les choses peuvent donc être disposées de manière que l'eau qui entre dans le système n'ait pas besoin de clapet pour l'empêcher de retourner en arrière quand l'oscillation remontera dans la grosse branche, puisque l'ascension au-dessus du niveau à épuiser ne sera pas assez forte pour faire rétrograder la colonne liquide, qui s'introduit dans l'appareil. La longueur de son tuyau latéral peut être calculée de manière à régler, au moyen de l'inertie, les vitesses d'introduction en profitant de la force vive.

Il m'a semblé intéressant, au point de vue des principes, de donner quelques développements sur la possibilité de supprimer le clapet dont il s'agit. Mais, dans la pratique, je crois qu'il sera toujours prudent d'en employer un. C'était d'ailleurs surtout pour étudier les modifications des appareils à élever de l'eau sans pièce mobile, en forme de $\int$, que j'avais signalé le moyen de supprimer ce clapet. Il est au reste bien entendu que, pour se trouver dans de bonnes conditions, il faudrait que le niveau de l'eau à épuiser fût à une profondeur au-dessous du sommet de la grosse branche, calculée de manière que la colonne liquide d'introduction eût ses vitesses alternatives convenablement réglées par la colonne oscillante. On voit d'après cela combien les choses sont simplifiées dans la pratique par l'addition d'un clapet.

Principes relatifs à divers appareils à élever l'eau.

Au lieu de considérer l'appareil représenté fig. 17, pl. VIII (voir p. 706.) comme ayant un tuyau de décharge très court par rapport à celui d'amont, il est intéressant d'examiner ce qui se présenterait si c'était au contraire le tuyau de décharge qui fût très long, l'autre pouvant être alternativement bouché. L'appareil pourrait être amorcé aussi au moyen d'oscillations

successivement croissantes, parce que la colonne liquide contenue dans le tuyau de décharge, résistant par son inertie, permettrait à ces oseillations de se produire dans des limites assez étendues. Je suppose qu'on ait obtenu ainsi la profondeur à lequelle on veut que l'oscillation descende.

L'eau, en montant alternativement au-dessus du niveau d'aval, agira sur la colonne de décharge d'une manière parfaitement analogue à ce que je viens de rappeler relativement à d'autres appareils, même sans qu'il soit indispensable qu'il y ait de ce côté un clapet de retenue, si cette colonne liquide est assez longue. Supposons d'abord qu'elle en ait un. L'eau montera dans le tube d'ascension et il s'en versera moins au sommet que si ce clapet ne permettait pas à la colonne montante d'engendrer une certaine vitesse dans le tuyau d'évacuation. La différence de la quantité d'eau versée à ce sommet avec celle qui y serait reçue dans le cas où le clapet ne s'ouvrirait point pendant l'ascension, sera d'autant moindre que ce tuyau sera plus long. On conçoit qu'en vertu de la force vive quelconque qui y sera engendrée, l'oscillation tendra à redescendre plus bas que s'il avait été bouché entièrement pendant toute la durée de l'ascension.

Il est d'ailleurs évident que, pour un certain niveau de décharge, l'eau en montant et en descendant engendrera des vitesses qui seront alternativement diminuées, de manière que le liquide soit périodiquement réduit au repos dans le tuyau qui le conduit au bief d'aval si ce tuyau est assez long.

Pour bien se rendre compte de l'influence de cette longueur sur les effets dont il s'agit, il faut distinguer le mode d'action latérale de la colonne liquide pendant qu'elle monte au-dessus du niveau d'amont, de ce qui se présentera quand le tuyau d'arrivée sera bouché. Si celui d'évacuation est beaucoup plus lóng que celui-ci, la première action latérale dont je viens de parler durera bien moins que le reste de la décharge. On conçoit d'après cela comment la question peut être modifiée, quant au règlement des niveaux qui permettraient de sup-

primer un clapet de retenue. Il sera, au reste, plus sûr d'en mettre un dans le tuyau d'évacuation.

Pour employer ce systèmo de cette manière, on suppose que le tuyau d'amont puisse être alternativement bouché et garder l'eau dans les deux sens. On pourrait se servir pour cela de vannes ordinaires. Mais afin d'éviter les frottements résultant de pressions qui ne seraient pas contrebalancées, l'emploi d'une vanne cylindrique disposée comme dans le tuyau d'amont des compresseurs de Bardannèche, dont j'ai donné la description, p. 868, 869, en indiquant quelque modification, serait plus rationnel et l'on verrait d'ailleurs si une soupape de Cornwall ne serait point préférable à une vanne cylindrique. Il est à remarquer que cette vanne ou soupape pourrait être manœuvrée avec précision au moyen d'un piston alternativement pressé dans deux sens opposés, comme je l'ai expliqué pour les machines de ce genre (1).

Il s'agit maintenant de voir ce qui arrivera si la communi-

(1) Si la disposition générale dont je viens de parler est plus facile à exécuter que celle de la figure 16, planche VIII, voir p. 705, 706, elle a le désavantage, pour le cas où l'on a non-seulement à élever de l'eau mais à la conduire à d'assez grandes distances, de la laisser reposer alternativement dans le tuyau d'amont. J'ai donc ajouté quelques détails à ce sujet. Sur la planche VIII la figure 16 *bis* est une projection sur un plan et la figure 16 *ter* est une coupe dont le but est de montrer la disposition d'un tube latéral de sections quadrangulaires KK, qui mettrait en communication le tube d'ascension avec le tuyau qui est au-dessous de la soupape, si une porte P n'interceptait pas cette communication. Elle décrit alternativement un quart de cercle étant pressée successivement sur chacune de ses faces, afin de faire fonctionner la soupape EE. Mais pour cela il est évidemment convenable que le tube KK ne soit pas rectiligne dans toute son étendue. C'est pour cette raison que le plan présente une projection L, ayant pour but d'indiquer sommairement cette forme aux environs de l'axe de la soupape EE, celle-ci est d'ailleurs disposée de manière que les deux tubes verticaux FF′ ne puissent être jamais en communication. Cette soupape peut fermer par le simple frottement, des expériences connues ayant montré qu'aux époques où les eaux avaient une pureté convenable cela n'avait pas d'inconvénient. On pourrait d'ailleurs laisser au besoin un peu de jeu entre elle et les parois qui l'enveloppent, de ma-

cation est alternativement interrompue avec le bief d'amont, soit au moyen d'un siphon alternativement amorcé, soit au moyen d'une soupape annulaire disposée à l'origine de ce tuyau comme dans la fig. 21, pl. VIII, sans que les sections transversales soient jamais bouchées comme on a supposé qu'elles l'étaient pour les fig. 15 et 16.

Considérons d'abord un siphon renversé ordinaire à branches verticales parallèles de diamètre constant. Abstraction faite des résistances passives, la hauteur à laquelle l'eau arrivera dans la seconde branche ne dépendra pas de la profondeur d'où le niveau commencera à monter dans la partie verticale de cette dernière. Si donc une certaine quantité d'eau motrice peut être introduite sur le sommet de la colonne liquide de la première branche, la profondeur de l'eau de la seconde peut être réglée de manière que le niveau dans celle-ci distribue sa course au dessus et au dessous d'un niveau extérieur, de décharge, bien entendu au dessous du sommet de la première branche, à peu près comme on le voudra, dans des limites assez étendues.

On conçoit déjà, d'après ce qui précède, comment les effets peuvent être modifiés, sur un tuyau de décharge latérale,

nière à ne la faire fermer complètement qu'en s'appuyant sur des sièges.

J'ajoute aussi à la planche VIII, figure 30, un croquis du déclic qui m'avait été provisoirement indiqué pour la forme de l'appareil décrit page 710. Comme il a fonctionné en présence d'une commission de l'Institut, on a pensé qu'il n'était pas sans quelque intérêt de mieux préciser la manière dont cette expérience avait été faite.

Le petit balancier à clanche CP retient une dent D fixée à une poulie M, qui, au moyen d'une corde alternativement enroulée sur cette poulie, est attelée d'un côté au tiroir et de l'autre à un contre-poids. Quand l'eau monte dans le réservoir A, en communication avec la capacité quelconque qui doit être alternativement remplie d'eau, le levier GK, en vertu du soulèvement du flotteur L agissant sur lui par une tige T et une corde E, tourne autour du point N. Ce levier fait monter l'articulation O qui, tournant autour du point H, ne peut agir sur la clanche C qu'à l'époque où il redescend lorsqu'ensuite il est abandonné à son poids par le flotteur L.

débouchant dans la seconde branche. Cela donne un moyen de soustraire une partie de l'eau motrice, afin de pouvoir recommencer après un versement au sommet de celle-ci. La colonne liquide fera ensuite une oscillation en retour dans la première branche pour venir à la rencontre de la force motrice, soit en amorçant un siphon, soit en soulevant une soupape annulaire par des moyens indiqués dans cet ouvrage. Quelques détails sont nécessaires pour mieux faire comprendre les principes.

Si une colonne liquide oscille dans un siphon renversé dont la première branche reçoit ainsi alternativement une certaine quantité d'eau motrice, celle-ci étant supposée d'abord aussi petite qu'on le veut, l'eau montera dans la seconde branche aussi peu qu'on le voudra au-dessus du niveau d'amont. Or, il résulte de cette considération, quant aux limites, qu'on peut choisir la hauteur du niveau d'aval ou de décharge pour obtenir le résultat suivant. La colonne liquide parcourra au-dessus et au-dessous de ce niveau des chemins, combinés de manière que l'écoulement de dedans en dehors vers un bief d'aval cesse alternativement, en vertu de la baisse de l'oscillation au-dessous du niveau dont il s'agit, comme je l'ai expliqué pour d'autres combinaisons. J'ai supposé d'abord qu'on choisissait la limite inférieure de la hauteur du versement au sommet pourvu que l'oscillation en retour ait assez de puissance pour amorcer alternativement un siphon ou soulever une soupape. Mais on peut évidemment varier ces effets dans des limites assez étendues, les dispositions précitées permettant à l'oscillation de descendre, comme je l'ai expliqué, à des profondeurs beaucoup plus grandes.

J'ai supposé aussi, pour faciliter l'explication, que les branches du siphon renversé étaient verticales et de diamètre constant. Les effets pourraient être variés, si elles étaient inclinées ou de sections inégales. Je me borne à une indication succincte de ces idées, afin de donner des exemples des applications dont elles peuvent être théoriquement susceptibles.

Mais les considérations présentées pages 792 et suivantes me paraissent bien plus pratiques. Il était intéressant de faire concevoir comment on pourrait obtenir, dans ces conditions, un appareil à élever de l'eau au moyen d'une chute motrice sans aucune pièce quelconque mobile. Si, d'ailleurs, au moyen de soupapes, on voulait employer ces principes d'une manière plur sûre, j'ai déjà dit que je préférerais, en général, d'autres formes de mes systèmes.

Mes premiers appareils sans pièce mobile avaient spécialement attiré l'attention de M. Arago, comme moyen d'expliquer certains phénomènes des fontaines naturelles. J'avais aussi présenté à l'Institut et à la société philomathique différentes combinaisons d'appareils à élever de l'eau sans pièce mobile. Mais elles ne me paraissent point assez simples pour qu'il y ait des chances sérieuses de les rencontrer dans les fontaines naturelles. Je rappellerai donc seulement, en renvoyant, au besoin, à ma communication faite à la société philomathique le 24 Août 1839 (voir le journal l'*Institut*) qu'il ne serait pas impossible de faire marcher, sans aucune pièce mobile, des appareils présentés à diverses époques par de Trouville, William, Close, Jumelin, etc. Ce genre de considérations s'éloigne de l'objet spécial de cet ouvrage.

Sans entrer dans d'autres détails à ce sujet, je ferai remarquer qu'il n'est pas d'ailleurs indispensable, pour quelques applications à l'étude des fontaines naturelles, qu'un appareil soit susceptible de fonctionner d'une manière continue. Si, par exemple, celui qui, sans pièce mobile, élève de l'eau par des oscillations accumulées (voir p. 886 et suivantes), peut amorcer un siphon par un mouvement de bas en haut, on conçoit, d'après ce qui a été dit dans cet ouvrage sur les siphons amorcés ainsi alternativement, qu'il peut en résulter des effets intéressants.

NOUVELLES SÉRIES

D'EXPÉRIENCES SUR LES ONDES

J'ai signalé dans la première partie de cet ouvrage divers phénomènes se rapportant plus ou moins à l'étude d'un moyen proposé par M. Cialdi pour éviter l'ensablement des ports-chenaux. J'ai dit, p. 304, que j'avais commencé avec M. Bertin quelques expériences sur les effets du sable répandu au fond d'un canal, quand on a posé dans ce dernier des planches *verticales* simulant des digues convergentes. J'ai donné les dimensions du canal et les moyens employés pour y produire des ondes pendant plusieurs heures, au moyen d'une machine à vapeur. La plupart des expériences ont duré au moins quatre heures et souvent sept. Depuis l'impression de cette première partie, qui était terminée en août 1880, j'ai varié les observations dont il s'agit.

Nous avions reconnu que, dans certaines conditions, le passage rétréci de cette manière n'était pas débarrassé des sables. Il semblait d'abord que les phénomènes qui se présentaient au fond de l'eau ne devaient pas être aussi différents de ceux qui étaient observés à la surface. En général la sciure de bois répandue sur celle-ci était, en vertu du mouvement des vagues, repoussée en arrière ou en avant, de sorte que, à une assez grande distance en amont et en aval du rétrécissement dont il s'agit, on ne retrouvait plus cette sciure de bois.

J'ai, depuis cette époque, varié la grandeur et la position

des planches simulant ainsi des digues convergentes. Lorsque l'orifice qu'elles laissaient libre avait à peu près la moitié de la largeur du canal, les deux planches formant chacune le même angle avec l'axe de celui-ci, le sable affectait diverses formes géométriques très régulières pour chacun des orifices dont il s'agit. A droite et à gauche, le fond était nettoyé en aval comme par deux tourbillons réguliers, dont chacun allait en général jusqu'à la paroi du canal. Or, il résultait de l'intersection des deux surfaces courbes qu'il se présentait une véritable pointe de sable devant le milieu de l'orifice, il y avait même des cas où cette pointe pénétrait au moins jusqu'à cet orifice, ce qui était bien différent de ce qu'il semblait qu'on aurait dû espérer, d'après les mouvements précités de la sciure de bois à la surface de l'eau.

J'ai disposé ensuite des orifices formés par des prismes triangulaires placés d'un seul côté du canal, un des côtés de la section s'appuyant contre une des parois, l'arête opposée formant étranglement entre celle-ci et l'autre paroi, il en est résulté des effets très singuliers d'un autre genre. Les bords du prisme dont la section était en général un triangle rectangle formant étranglement étaient nettoyés ; mais le sable occupait une partie plus ou moins grande du reste de l'orifice compris entre lui et les parois du canal. J'ai conclu de ces divers effets que la réaction des parois de celui-ci changeait si complètement l'état de la question, qu'il était indispensable de recommencer ces études en faisant déboucher les ondes dans un réservoir assez large pour que la réaction de ses parois ne changeât pas autant la nature des phénomènes qui se présentent à la sortie des digues convergentes.

J'avais déjà obtenu des résultats plus réguliers au moyen d'une planche inclinée, analogue à la vanne d'une roue à la Poncelet; il est d'ailleurs à remarquer, dans ces conditions, que la veine liquide étant obligée de passer au-dessous de cette planche perpendiculaire aux parois latérales du canal, les ondes étaient brisées d'une autre manière que lorsqu'elles

passaient par un orifice resté libre entre deux planches verticales.

Il est essentiel, quand on fait des expériences sur un canal factice, de ne considérer en général comme applicables à des circonstances, qui paraissent semblables au premier aperçu, que les phénomènes des mouvements linéaires, réels ou apparents des ondes, je veux dire des mouvements de celles qui ne sont pas trop influencées par les réactions latérales des parois. Ces nouvelles séries d'expériences mettent hors de doute cette conclusion.

Je dois même avertir, pour éviter tout malentendu, que quelques phénomènes décrits dans la première partie de cet ouvrage, tout en conservant leur degré d'intérêt, ne seraient pas suffisants, comme on aurait pu le penser au premier aperçu, pour étudier des mouvements qui diffèrent beaucoup au fond de l'eau de ce qu'on observe à la surface. Il est bien établi désormais, à quel point les phénomènes provenant d'un rétrécissement occasionné par des planches verticales à l'intérieur d'un canal diffèrent de ceux qui résultent d'un rétrécissement à l'extrémité du même canal débouchant dans un réservoir de même profondeur, mais d'une assez grande étendue.

Il y avait cependant une forme d'orifice donnant lieu à une *chasse* en aval des digues ayant beaucoup d'analogie avec ce qui se présente dans le cas dont je viens de parler. Cet orifice était formé de planches verticales. Il était compris au milieu de la largeur du canal, entre deux planches perpendiculaires à l'axe de celui-ci. L'extrémité d'une de ces planches était l'arête d'un prisme dont la section était un triangle rectangle. L'hypothénuse de ce dernier était disposée en amont, s'appuyant par l'autre extrémité contre une paroi du canal. A l'extrémité de la seconde planche précitée, s'appuyait une longue planche verticale parallèle à l'axe de celui-ci. Une autre planche était disposée en amont, de manière à éviter un changement trop brusque des sections. Il est résulté de

cette disposition que le sable a été chassé en amont et en aval, d'une manière ayant de l'analogie avec ce que j'exposerai plus loin.

Cette disposition de l'orifice faisait rejeter principalement le courant du côté où une des planches verticales était parallèle à l'axe du canal. Il y avait donc une raison pour que les tourbillons résultant de la présence de la paroi de ce dernier fussent rejetés du même côté. On conçoit d'après cela pourquoi l'on ne trouvait pas de traces, bien sensibles du moins, du tourbillon qui avait été observé du côté opposé pour une autre disposition de l'orifice. Ce résultat offrait déjà quelque intérêt.

Mais il était essentiel de faire une étude plus directe sur les mouvements des ondes pénétrant d'un canal dans un réservoir. Cette étude commencée à la fin de 1880, avec un réservoir de $2^{m},30$ de large et de $1^{m},68$ de long dans le sens de l'axe du canal, a été continuée dans l'été de 1881. Les résultats obtenus ayant donné des indications plus positives sur les effets des digues convergentes, en septembre 1882 on a construit un autre réservoir de $3^{m},90$ de large et de $3^{m},30$ de long à la même extrémité de ce canal factice. Déjà en 1881, on avait constaté qu'en rétrécissant d'environ moitié la bouche du canal par un prisme triangulaire, l'hypothénuse de sa section étant disposée du côté d'amont, cela suffisait, dans certaines conditions, pour empêcher le sable de passer du canal dans le réservoir, quand il était répandu sur le fond de ce canal à une distance convenable de la bouche de sortie. Ce fait a été confirmé en 1882; à cette dernière époque surtout, on a observé les mouvements d'une couche de sable, très mince, répandue sur le fond du réservoir. Les ondes venant du canal et renvoyées d'une manière oblique, par le prisme triangulaire, ont chassé le sable dans la direction à laquelle on pouvait s'attendre, d'après ce qui a été dit dans la première partie.

Mais les phénomènes qui se sont présentés devront être

étudiés ultérieurement ; je ne chercherai pas à rendre compte *a priori* des raisons pour lesquelles le sable, chassé d'ailleurs généralement dans la direction précitée dans le fond du réservoir, laisse divers espaces entièremeut nettoyés, cela dépend sans doute de tourbillons dont il est difficile d'étudier les détails.

En 1881, avec le réservoir de dimensions plus restreintes, on avait fait des observations sur des orifices de sortie, moitié moindres et même quatre fois moindres, la section de ces derniers étant par conséquent réduite à un huitième de celle du canal. Les sections des prismes formant étranglement étaient des triangles rectangles. On avait pris successivement pour leurs sections triangulaires des hypothénuses de diverses longueurs. Ils étaient tous formés de planches verticales. Le sable a été arrêté en amont de l'orifice, quand il était posé à une certaine distance de celui-ci. Lorsqu'on mettait une mince couche de sable au fond du réservoir, la partie de ce fond qui était complètement nettoyée était d'autant plus grande par rapport aux dimensions de l'orifice de sortie, que celui-ci était plus étroit. Il est d'ailleurs à remarquer que, dans ce dernier cas, les ondes étaient beaucoup plus diminuées de hauteur dans le réservoir, relativement à celles du canal. Leur hauteur n'était plus que d'un centimètre, tandis qu'elle était de huit à dix centimètres dans le canal.

Diverses expériences précitées sur les effets des rétrécissements à l'extrémité d'un canal factice ayant été faites au moyen d'orifices où la hauteur de l'eau était notable par rapport à leur largeur, j'ai tâché de me rendre compte de ce qui se présenterait pour des orifices bien plus larges. Dans ceux où ont été faites ces observations, il se présentait une espèce particulière de tourbillons se balançant en quelque sorte en amont et en aval. Je veux dire qu'un tourbillon sortait de l'orifice et y rentrait alternativement, ne s'étendant d'ailleurs qu'à une assez petite distance.

Considérons d'abord un courant ordinaire entre deux digues convergentes laissant un passage dans leur angle. Si le liquide, dans ce passage, n'a qu'une petite profondeur relativement à sa largeur, le mouvement pourra se propager en aval à une distance bien plus grande que dans le cas où cette largeur serait moindre, toutes choses égales d'ailleurs.

Si maintenant on considère les actions et réactions des vagues contre les digues convergentes précitées, pour étudier les courants qui peuvent en résulter, les effets seront sans doute différents de ce qui aurait lieu si une seule vague s'étendait comme une barre d'une digue à l'autre. Mais en considérant l'ensemble, on conçoit qu'il est possible que les mouvements plus ou moins irréguliers des vagues, qui ne sont plus continues, présentent des effets généraux ayant une assez grande analogie avec ce qui se passerait pour une seule vague graduellement étranglée. Or, s'il en résulte un courant très large, il sera beaucoup moins influencé par la communication latérale du mouvement des liquides que s'il était plus étroit. Mais on ne sait pas assez à quelles distances les ondes peuvent agir par leur réaction sur l'eau comprise entre les digues pour pouvoir *à priori* se rendre compte de la manière dont un courant pourrait résulter de leurs coups de bélier sur toute la largeur d'un passage. Il y a cependant lieu d'espérer que les observations faites entre des planches simulant des digues convergentes dont l'orifice n'est pas large par rapport à la profondeur de l'eau, ne conduiront point à des résultats exagérés quant à la distance à laquelle les sables seraient repoussés en aval.

Il est bien entendu que ces considérations ne dispenseront pas de faire des expériences plus variées et sur une plus grande échelle, de manière à se rapprocher davantage des conditions de la pratique. Mais il m'a semblé qu'il n'était pas sans intérêt de les indiquer, quand cela ne serait que pour donner une idée du genre de direction que l'on peut concevoir pour ces expériences. Il faut d'ailleurs, comme dans les

expériences précitées, que les digues aient une longueur assez notable, par rapport à la largeur du passage resté libre dans leur angle, pour qu'on puisse espérer que les observations servent à éclairer la question.

Si, au lieu d'étudier l'effet des vagues entre des digues verticales convergentes, on les étudiait sous des surfaces inclinées du côté d'aval, analogues à des vannes de roues à la Poncelet, les expériences, dont j'ai dit quelques mots ci-dessus, donneraient une idée de ce qui se présente. Mais dans les conditions analogues à celles des expériences faites sur ce sujet à Cherbourg, ce serait surtout au-dessus des veines liquides de sortie que les tourbillons diminueraient la force du courant.

Pour diminuer la hauteur des ondes dans le réservoir, on avait disposé contre la paroi opposée à la bouche du canal et contre les deux parois perpendiculaires à celle-ci des espèces de grillages en fer appelés caillebotis, inclinés de manière à diminuer les mouvements de retour contre la bouche du canal. Quand on répandait de la sciure de bois sur la surface du réservoir et du canal, celle qui était mise sur le canal ne passait pas dans le réservoir lorsqu'il n'y avait pas de vent. Celle qui était répandue sur le réservoir était chassée en très peu de temps jusqu'auprès des parois précitées.

Des conditions très peu différentes les unes des autres suffisent pour varier les effets d'une manière dont il est difficile de se rendre compte. Ainsi, quand la longueur de la planche verticale, formant étranglement à l'extrémité du canal, en s'appuyant contre une des parois de celui-ci, était assez notablement augmentée, on trouvait des saillies de $0^m,002$ à $0^m,003$ à des endroits où les sables, ayant eu à l'origine du mouvement une épaisseur très petite, avaient été complètement balayés pour une longueur moindre de cette planche, le courant général se faisant d'ailleurs assez régulièrement sentir à une distance au moins double de celle de l'orifice resté libre.

Pour une même planche d'une longueur donnée, la profondeur de l'eau dans le canal étant de $0^m,355$, ainsi que dans le réservoir où il débouchait, le sable, d'une épaisseur de $0^m,001$, était beaucoup plus franchement chassé dans le réservoir que lorsque la profondeur de celui-ci était augmentée seulement d'un demi-centimètre, la hauteur des vagues dans le canal étant de $0^m,08$ à $0^m,10$.

Quand on répandait de la sciure de bois sur l'eau du réservoir, elle était entièrement chassée bien plus loin de l'orifice du canal près duquel elle avait été mise que le sable du fond. Il est même à remarquer que des observations ayant été faites en 1880, à une époque où, à la place de ces caillebotis, on avait mis des planches inclinées, il y avait du sable déposé sur ces dernières, quand il était saupoudré dans le réservoir près du canal. Cet effet et celui de la sciure de bois précitée sont faciles à expliquer. La vitesse de l'eau en mouvement doit être en effet notablement plus grande à la surface qu'au fond. Cette remarque n'est pas d'ailleurs sans quelque intérêt pratique, car, si les sables sont en suspension dans les vagues, ceux qui se trouvent à la partie supérieure doivent être rejetés assez loin; il y en a donc une certaine quantité qui, même sans être chassée sur le fond, ne se dépose pas près de la bouche du canal.

J'entrerais dans beaucoup plus de détails s'il n'y avait pas lieu d'espérer que ces diverses expériences seront répétées et variées sur une plus grande échelle ; de sorte que ce qui précède doit être seulement considéré comme un aperçu présentant d'ailleurs quelques nouvelles indications sur des phénomènes encore si peu connus. Les réservoirs dont je viens de parler n'étaient pas d'ailleurs assez grands, à beaucoup près, pour que les ondes pussent agir comme si elles avaient débouché dans la mer. Cependant, ils l'étaient assez pour permettre de continuer régulièrement les expériences pendant plusieurs heures consécutives, à cause de la manière dont les vagues diminuaient de hauteur en pénétrant dans ces

réservoirs. Ainsi, les vagues du canal ayant des hauteurs de $0^m,08$ à $0^m,10$, celles du réservoir n'avaient plus, pour la plupart des expériences, que des hauteurs de $0^m,02$ environ. Dans bien des cas, la bouche du canal étant rétrécie de moitié, l'hypothénuse de la section du prisme triangulaire formant étranglement était de $0^m,48$.

Le fait le plus nouveau qui résulte de ces nouvelles séries d'expériences consiste en ce que les orifices restés libres, soit entre des digues convergentes, soit sous des plans inclinés, peuvent être disposés, dans certaines conditions, de manière à empêcher le sable de passer, sauf peut-être quelques grains, du canal dans le réservoir ou de celui-ci dans le canal, quand ce sable a été déposé sur le fond de l'un ou de l'autre à une distance suffisante de la bouche du canal. Cela dépend d'ailleurs de la disposition des surfaces. Ainsi, lorsqu'une des planches verticales, formant étranglement à l'extrémité de celui-ci, n'interceptait qu'un tiers ou même environ deux cinquièmes de sa section, il n'y avait de nettoyé qu'un certain espace le long de cette planche en amont et du même côté en aval dans le réservoir. Une partie notable de l'orifice de sortie du côté de la paroi opposée du canal contenait beaucoup de sable, tandis qu'il n'y en avait pas, en général, quand cette bouche de sortie était réduite à la moitié de la section du canal, c'est-à-dire à $0^m,25$, et, à plus forte raison, lorsqu'elle était encore moindre, sauf les exceptions résultant de phénomènes dont je vais donner une idée.

Il ne faut pas confondre les effets dont je viens de parler avec ceux qui se produisent quand on saupoudre du sable soit en amont, soit en aval de l'orifice de sortie dont il s'agit, ou quand il est assez agité pour se répandre dans toute la hauteur de la masse d'eau. On conçoit, en effet, que le sable en suspension dans l'eau passe nécessairement avec celle-ci, notamment lorsqu'il est entraîné par des tourbillons. Aussi l'aspect général était bien différent de ce qui a été dit ci-dessus, dans diverses séries d'expériences faites en saupou-

drant du sable pendant très longtemps. Celui qui était répandu dans l'intérieur du canal se trouvait chassé en partie dans le réservoir, et quand on le saupoudrait dans celui-ci, du moins assez près de la bouche du canal, il pouvait en entrer dans ce dernier. On conçoit d'après cela combien les effets peuvent être influencés par le degré d'épaisseur des sables déposés d'avance, et par les degrés des vitesses de l'eau dépendant du mouvement des vagues. S'il en résulte que les sables soient soulevés avec assez de force pour être tenus en suspension dans toute la hauteur de l'eau, les résultats peuvent se rapprocher plus ou moins de ce qui a été observé quand on saupoudrait le sable. Cela explique pourquoi on trouve du sable à des endroits où l'on n'en avait pas trouvé pour des observations faites dans des circonstances qui pouvaient paraître semblables.

En définitive, les coups de bélier provenant des vagues exerçaient une forte chasse sur le sable répandu dans le réservoir et portaient d'ailleurs jusqu'à l'extrémité opposée de ce dernier une partie des sables tenus en suspension dans les vagues. De sorte que celles-ci étaient réellement employées, soit à faire un curage immédiat dans le réservoir, quand elles y trouvaient les sables déposés, soit à faciliter un curage ultérieur par des moyens quelconques, en poussant une partie des sables tenus en suspension dans l'eau à des distances considérables par rapport à la largeur de la bouche du canal.

Les phénomènes du mouvement, dans les diverses circonstances dont il s'agit, dépendent de conditions que je ne peux préciser encore d'une manière assez complète, jusqu'à ce que les expériences aient été faites sur une plus grande échelle.

Le réservoir ne pouvait s'étendre qu'à une distance de $0^m,95$ à gauche de la paroi du canal à cause des besoins du service du port. On avait donc mis les planches formant étranglement de manière à jeter les vagues du côté droit. Il en résultait que quelques grains de sable seulement pouvaient être en général déposés dans le réservoir à gauche

de la bouche de sortie. Cependant il y avait des exceptions dont j'ai indiqué les causes. A la fin de chacune de ces expériences, on vidait avec précaution le réservoir et le canal de manière à bien conserver les formes affectées par le sable et l'on faisait ensuite des dessins cotés les plus exacts possible. On conçoit d'ailleurs que le vent avait sur les divers phénomènes une influence dont il fallait tenir compte lorsque le temps n'était pas très calme.

Quand une planche inclinée du côté d'aval était posée perpendiculairement aux parois verticales en laissant un passage au-dessous d'elle, les effets de coups de bélier des vagues étaient débarrassés autant que possible des tourbillons latéraux. Cependant il était essentiel pour cela que les tasseaux sur lesquels cette planche était clouée descendissent assez peu dans l'eau du canal. Il y avait un degré d'enfoncement de cette planche pour lequel le sable était repoussé en amont et en aval, de manière que la partie nettoyée était limitée par des lignes assez sensiblement droites et parallèles l'une à l'autre. Mais la ligne d'aval pouvait prendre une légère courbure vers l'aval ou l'amont selon le degré d'enfoncement de la planche. Il y a même eu des circonstances où les tasseaux précités ayant certaines dimensions et se trouvant notablement enfoncés au-dessous de l'eau la partie nettoyée tant en aval qu'en amont avait dans son ensemble la forme d'un ovale. Moins cette planche était enfoncée, plus toutes choses égales d'ailleurs, la courbe limitant la couche de sable en amont était ainsi concave.

Lorsqu'au lieu de disposer cette planche loin des extrémités du canal on la mettait assez près du réservoir vers lequel se dirigeaient les ondes, le sable était chassé en aval, mais en affectant une courbure très prononcée pour plusieurs bourrelets consécutifs, l'angle de la planche avec le plan horizontal étant de 34 degrés. Le jour où cette dernière observation a été faite la courbure dont il s'agit a pu être influencée par le vent. Mais il y a lieu de penser que cette influence n'a pas

empêché la forme générale de représenter assez sensiblement le phénomène. On conçoit que les tourbillons latéraux, s'ils étaient supprimés pour une disposition analogue de cette planche loin des extrémités du canal, pouvaient se développer quand les ondes pénétraient immédiatement du canal dans le réservoir.

J'ai annoncé, p. 366, que je varierais les études sur la baisse résultant, dans un réservoir latéral, du mouvement des ondes dans un canal sur les dimensions duquel j'ai ajouté quelques détails, p. 367. C'est d'ailleurs celui sur lequel ont été faites les expériences précédentes. J'ai employé le même réservoir, mais il était en communication avec ce canal par un tuyau en cuivre de 5 mètres de long et de $0^m,06$ de diamètre intérieur. Il en est résulté dans certaines conditions une baisse assez sensiblement constante, mais dont la profondeur ne dépassait pas la moyenne de celles qui y avaient été observées, c'est-à-dire, qu'elle était à peu près la moitié de la baisse maximum obtenue, quand le tuyau de conduite était très court. On a ensuite varié la forme et les dimensions des orifices d'entrée et de sortie. Il y a eu des conditions pour lesquelles on a cru remarquer une augmentation notable de baisse dans le réservoir latéral. Mais les observations n'ayant pas été assez répétées et ayant été faites à un moment où l'on était gêné par le vent, on ne peut que signaler à ce sujet les recherches nouvelles qui restent à faire.

Il ne s'agit d'ailleurs que d'un premier aperçu. Les effets sont très différents pour chaque espèce de vagues résultant des dispositions diverses d'un même canal. Ainsi, quand on produit des ondes en *zig zag*, à cause d'un obturateur partiel fixé d'un côté du canal, on conçoit que les percussions résultant de cette forme de vagues peuvent faire plus que compenser les effets de diminution moyenne des pressions latérales provenant du mouvement oscillatoire. Cet exemple est un de ceux qui montrent combien il est essentiel, pour pouvoir faire des applications des phénomènes observés, de

se borner autant que possible, comme je l'ai dit, quant aux études sur un canal factice, à celles qui peuvent être faites sur les ondes dont le mouvement de translation apparente est aussi régulièrement que possible parallèle à l'axe du canal.

Il y a divers moyens de faire en sorte que la baisse dans le réservoir latéral soit aussi continue que possible. Par exemple, on a terminé le tuyau de conduite assez au-dessous du niveau de l'eau dans ce réservoir par un ajutage conique dont la petite base était extérieure à cette extrémité du tuyau. On a favorisé aussi la baisse continue, je veux dire, sans retour trop sensible de bas en haut, en disposant à l'origine du tuyau latéral sur la paroi du canal un bouchon en bois percé de petits trous ou d'échancrures disposées de plusieurs manières.

L'inertie de l'eau dans le tuyau de conduite avait déjà de l'influence sur la régularisation des effets, quand on supprimait ce bouchon. Mais jusqu'à présent, cette inertie n'a pas toujours suffi pour obtenir une baisse aussi continue que cela était arrivé pour ma fontaine intermittente décrite p. 159 et suivantes. On a plusieurs fois remarqué que le niveau de l'eau dans le réservoir latéral avait des oscillations d'une durée assez longue par rapport à celle de chaque vague.

Je me borne, jusqu'à ce que ce genre d'expériences ait été répété sur une plus grande échelle, à signaler les observations que je viens d'indiquer comme une confirmation des principes exposés dans la première partie de cet ouvrage. Les expériences dont il s'agit n'ont pas encore été assez variées par un temps absolument calme, pour qu'il soit possible de préciser les conditions dans lesquelles la baisse de l'eau du réservoir latéral peut être considérée comme sensiblement constante.

J'ai fait aussi des observations en portant à $10^{m},20$ la longueur du tuyau de conduite dont je viens de parler. Ces diverses expériences n'ont pas encore été assez répétées, mais on a particulièrement remarqué des oscillations à longues

périodes qui se produisent dans le niveau du réservoir latéral. Ce genre d'observations est d'ailleurs plus curieux qu'utile, ayant principalement pour objet l'étude des effets du mouvement des vagues sur les cours d'eau souterrains ; tandis que les recherches relatives aux effets des digues convergentes me paraissent devoir être signalées aux ingénieurs qui pourraient avoir occasion de faire des observations semblables.

Les expériences, objet de ce chapitre, ont été faites sous ma direction, dans l'arsenal du grand port de Cherbourg. Il y en a beaucoup que j'ai faites moi-même, ayant cru devoir constater l'exactitude de celles qui m'ont paru les plus importantes ; j'ai d'ailleurs discuté trente-trois dessins faits avec soin et divers croquis cotés de manière à pouvoir présenter des conclusions en attendant que des observations soient faites sur une plus grande échelle.

Note sur les effets des différences des vitesses des filets liquides à la surface d'un cours d'eau.

Cette note se rattache aux recherches sur les ondes, à cause de celles qui se présentent en général dans les cours d'eau permanents à grandes vitesses. Sur ceux qui sont assez rapides, des corps légers, tels que la sciure de bois, se sont rassemblés au lieu de la plus grande vitesse, *après avoir parcouru un chemin très court*, même quand ils étaient répandus près des bords. Pour des vitesses très petites, il n'en a pas été ainsi à beaucoup près dans les limites des observations que j'ai faites.

Je suppose d'abord, ce qui n'est point exact, que le rapport de la vitesse près de la paroi à la vitesse maximum de la surface fût constant, sur un cours d'eau successivement animé de vitesses très différentes, mais assez sensiblement uniformes pour chacune de celles qui seraient considérées.

Soit A la vitesse maximum, et B la vitesse contre les bords.

La différence A-B serait proportionnelle d'après l'hypothèse ci-dessus à l'une de ces vitesses, car si elles sont toutes multipliées par M, leur différence sera M (A-B). Or, si l'on suppose proportionnelle à cette différence la force qui tend à amener les corps légers des bords au lieu de la plus grande vitesse, on trouve qu'étant posés à un endroit donné, ils devraient pour toutes les vitesses arriver au filet animé de la vitesse maximum à une même distance de leur point de départ.

Si par exemple les vitesses sont doublées, le chemin parcouru dans le sens de l'axe du canal le sera dans un temps moitié moindre. Or, si la force qui agit transversalement est double, à cause d'une différence double entre les vitesses des deux filets précités, le chemin parcouru par le filet animé de la plus grande vitesse sera le même à l'époque où le dernier sera atteint par le petit flotteur. Il est facile de voir qu'il en sera ainsi lorsqu'au lieu de considérer seulement les deux filets précités, on considérera successivement tous ceux de la surface en supposant que les rapports de leurs vitesses fussent indépendants de la vitesse moyenne des cours d'eau.

Dans les limites de mes observations le résultat est bien différent, de sorte que les forces d'une nature quelconque, qui tendent à remener les petits flotteurs des bords au lieu de la plus grande vitesse augmentent bien plus que les différences des vitesses des filets liquides telles qu'on vient de les considérer.

Il est d'ailleurs intéressant de rappeler que, selon du Buat, dans un plan vertical mené par l'axe d'un cours d'eau, le rapport de la vitesse au fond à la vitesse à la surface serait moindre pour les petites vitesses que pour les grandes, toutes choses égales d'ailleurs. Or il y a lieu de croire que si cela est généralement exact, il doit en être ainsi, au moins jusqu'à un certain point, quant aux vitesses le long des bords et au milieu de la surface. Mais on va voir comment ces considérations théoriques doivent être interprétées au moyen d'observations sur la forme de la surface des cours d'eau.

C'était sur l'invitation de M. Boileau que je m'étais occupé en 1880 d'expériences ayant pour but d'étudier l'action des filets liquides les uns sur les autres à la surface des cours d'eau, abstraction faite de mes recherches antérieures sur les tourbillons et les ondes. Quand je lui ai communiqué les résultats, il m'a engagé à remarquer si la force qui amène les corps flottants dans la partie de la surface animée de la plus grande vitesse, ne proviendrait pas principalement d'une pente transversale qui aurait lieu des bords vers cette partie. Or, c'est précisément ce que j'ai observé dans une des séries d'expériences où il était plus facile que pour les autres de déterminer les différences des hauteurs de l'eau aux bords et au milieu d'un petit canal en bois, qui amenait l'eau à Cherbourg dans celui où j'ai fait des expériences sur les ondes. Il n'était pas d'ailleurs assez long pour que le régime fût ce qu'on est convenu d'appeler uniforme. Cela vient à l'appui d'une de ses prévisions, d'autant plus intéressante à étudier que, depuis du Buat, plusieurs hydrauliciens avaient accrédité l'opinion contraire.

On sait d'ailleurs que les opinions sont encore partagées sur la forme générale de la section transversale des cours d'eau. Les observations que j'ai faites à ce sujet ne sont pas suffisantes pour trancher la question. Il est donc bien entendu que j'ai seulement pour but dans cette note de préciser les principes au moyen desquels on pourra fixer les idées sur le mode d'action des divers filets liquides, d'après des observations plus complètes sur la forme de ces sections transversales (1).

(1) A l'occasion des expériences précitées, j'ai fait sur les mouvements de certaines sciures de bois, quand les vitesses étaient très petites, des observations qui ne sont peut-être pas nouvelles, mais dont je crois devoir dire quelques mots ne les ayant trouvées nulle part. Diverses parties de ces sciures de bois, résineux autant que je peux m'en souvenir, étaient mises en mouvement d'une manière tellement singulière qu'elles ressemblaient à des êtres animés.

PRINCIPES

D'UNE

NOUVELLE ROUE HYDRAULIQUE

A TUYAUX PLONGEURS

ET A COLONNES LIQUIDES OSCILLANTES

Les roues de côté à coursier plein d'eau ont été depuis longtemps proposées, notamment en 1777 dans *l'Essai sur les machines hydrauliques* par le marquis Ducrest, colonel en second du régiment d'Auvergne, et par Dryden (Voir *Treatise of mechanics*, par Gregory, 1806, article tide-mills, page 469, planche XXXV, fig. 4 (1).

(1) L'abbé Mann avait proposé de ne mettre que six ou huit aubes à des roues de côté, ce qui ne peut avoir de sens que pour une roue à coursier coulant plein. (Voir Mechanics for practical men, par Gregory, 1825, p. 318.) Pour les chapelets moteurs, l'idée de diminuer le nombre des aubes ou pistons est signalée par Tyer dans le Repertory of arts t. XXXVI, p. 8 (patente du 2 mai 1818 avec une planche). Quant à celle de leur donner à chacune une poupe et une proue, on la trouve, pour les chapelets élévatoires, dans les dessins de divers auteurs des trois derniers siècles, tels que Ramelli, Wolff, etc. Il est intéressant de voir une seule aube engagée dans le tuyau ou corps de pompe, et n'ayant à surmonter qu'une résistance constante, la partie de la colonne qui résiste par succion augmentant quand l'autre diminue.

De Thiville a depuis longtemps étudié des moyens de varier le débit des chapelets moteurs coulant à plein coursier, et dont le but est le même que celui des roues de côté à coursier toujours plein d'eau pour utiliser des chutes motrices très variables. Il donne au

Il ne paraît pas que ces roues se soient répandues, excepté peut-être pour les cas de ce qu'on appelait en général *roue de marée*, dont le but était d'utiliser des chutes motrices très variables. Elles avaient l'inconvénient de frapper avec leurs aubes la surface de l'eau du bief d'amont, dans lequel elles s'enfonçaient directement, et d'éprouver aussi de la résistance dans le bief inférieur, quand le niveau de celui-ci s'élevait à une assez grande hauteur au-dessus de celle à la-

coursier rectiligne de ces chapelets une section quadrangulaire, de sorte que deux faces verticales opposées peuvent se rapprocher ou s'éloigner l'une de l'autre, afin de varier convenablement le débit de l'eau motrice.

Quant à la manière de modifier la largeur des aubes, on peut employer plusieurs systèmes. Il suffit en ce moment de rappeler que de Thiville les composait pour ce cas de deux clapets, réunis par une charnière inférieure permettant à l'angle formé par ces deux clapets de s'ouvrir plus ou moins, selon le degré d'écartement des faces planes verticales dont je viens de parler.

Je me suis aperçu, en m'occupant de mes recherches sur l'histoire de l'hydraulique, qu'il y avait une ancienne disposition de roues de côté à laquelle on pourrait appliquer cette idée de de Thiville, à cause de la verticalité et du parallélisme de deux faces planes d'un coursier annulaire fixe, fendu intérieurement pour le passage d'une assez mince couronne, reliée aux bras, à laquelle sont attachés les pistons de forme quadrangulaire. (*Voir* le *Traité de Physique* de Desaguliers, in-4°, 1751, traduction de Pezenas, *Pl. XXXIII*, *fig.* 1, 2 et 3, t. II.)

Ce n'est pas seulement la forme quadrangulaire de la section du coursier qui permet de faire cette application d'un système particulier de vannage; mais c'est la forme dont il s'agit quand le coursier est *annulaire*. Si le fond courbe de la roue était plein et mobile autour de son axe, cela ne semblerait pas permettre d'appliquer, du moins d'une manière aussi convenable, le système de vannage à faces parallèles dont je viens de parler.

Ce qui paraît le rendre pratiquement possible, si l'on fait couler à plein coursier une roue de formes analogues à la roue de côté de Barker décrite par Desaguliers, c'est que, pendant tout le temps que durera l'écoulement pour un écartement donné des faces parallèles et verticales, les pièces courbes du coursier seront absolument fixes. Il est de plus essentiel de remarquer qu'aux époques où se fera la manœuvre de ces faces verticales, l'ajustement du fond de la roue réduit à un disque ou à une couronne ne pourra éprouver aucun changement, puisqu'on n'y aura pas même touché.

quelle l'eau sortait de ces roues. La vitesse de cette eau était alors perdue.

Le système que je vais décrire a pour but de diminuer ces deux causes de perte de force vive et d'indiquer d'ailleurs un moyen nouveau d'employer cette vitesse de sortie. Abstraction faite des services qu'il pourra rendre si l'expérience confirme son utilité pratique, je crois intéressant d'en signaler les principes, pour compléter l'exposition de diverses combinaisons dont sont susceptibles les colonnes liquides oscillantes.

Cette roue, au lieu d'être présentée sous sa forme primitive, pourrait être considérée comme un tambour portant extérieurement un anneau creux de section rectangulaire, partagé en plusieurs tuyaux par des aubes, dont j'indiquerai plus loin la disposition. En amont et en aval de chaque aube des orifices rectangulaires seraient ménagés sur la surface courbe extérieure de cet anneau. De sorte que chaque tuyau partiel serait percé latéralement à ses deux extrémités.

On conçoit déjà que ce système n'éprouverait pas le même genre de résistances que des aubes ordinaires, soit dans le bief d'amont, soit dans celui d'aval. Mais il donnerait lieu à des frottements d'une espèce particulière. Quand un tuyau partiel s'enfoncerait dans le bief d'amont, si l'on n'ajoutait aucune pièce extérieure, l'eau motrice y entrerait latéralement. Mais si cela évitait une percussion, il faudrait tenir compte de ce que le tuyau partiel, devant s'engager dans un coursier, la colonne d'eau qu'il contiendrait serait obligée de prendre assez brusquement la vitesse de la roue.

On va voir comment on peut tourner cette difficulté. Je reproduis d'abord comme pièce justificative un extrait du procès-verbal de la séance de la Société philomathique du 13 janvier 1849. Il suffira pour donner une première idée du principe des oscillations dont il s'agit. L'emploi des lames concentriques que j'ai signalé ensuite dans la séance du 28 juin 1851, permet d'ailleurs de simplifier beaucoup l'état

de la question, quant à l'entrée et à la sortie du liquide pour chaque tuyau plongeur, en diminuant la résistance de l'eau et les irrégularités provenant des mouvements de l'air.

«.... En disposant en amont et en aval du coursier des surfaces fixes ou portions de coursiers *secondaires*, il résulte du mouvement de la roue que les *tuyaux plongeurs* sont alternativement ouverts et fermés à chacune de leurs extrémités. De sorte que l'eau oscille dans ces tuyaux en y produisant des effets d'une espèce toute particulière. Ainsi quand les tuyaux commencent à s'enfoncer au-dessous du niveau du bief supérieur, leur extrémité inférieure est bouchée jusqu'à ce qu'elle soit parvenue à une certaine profondeur. Alors cette extrémité, se dégageant de l'espèce de coursier qui la bouchait, permet à l'eau de s'introduire dans le tuyau par dessous, et de s'élever, en vertu de la vitesse qu'elle acquiert, au-dessus du niveau du bief supérieur. L'eau redescend ensuite et prend graduellement la vitesse du tuyau qui se trouve rempli parce que celle de la roue est moins variable que la vitesse croissante de la colonne dont il s'agit, et dont le sommet se trouve atteint à l'époque voulue si les dimensions de la machine sont bien calculées... En résumé, cette disposition offre l'avantage de faire prendre à chaque colonne liquide, qui entre dans chaque *tuyau plongeur*, la vitesse de la roue sans changement brusque de vitesse. Cette eau agit d'ailleurs par son poids, soit directement, soit même à la rigueur en partie par succion.

« C'est aussi en vertu d'une oscillation d'une espèce particulière que l'eau sort de la roue. Comme elle a d'abord la vitesse du tuyau qui la renferme au moment où chaque tuyau commence à sortir du bief inférieur, il est facile de voir qu'elle doit, en vertu de cette vitesse, s'élever en partie à une certaine hauteur au-dessus du niveau de ce bief, ainsi que cela a d'ailleurs été expliqué dans les notes de 1845. Elle redescend ensuite, et, en vertu des principes de l'oscillation, elle abandonne le tuyau jusqu'à une certaine profondeur au-dessous du niveau du bief inférieur. Si donc les conditions sont calculées de manière qu'à cet instant le tuyau soit à peu près vidé, et vienne boucher celle de ses extrémités qui est devenue inférieure, en s'engageant dans la portion du *coursier secondaire* décrit plus haut, on voit que le travail employé à produire cette dénivellation au-dessous du niveau du bief inférieur trouve directement son application.... »

Pour bien comprendre cette ancienne note, il faut remarquer que la surface courbe formant un coursier supérieur doit toujours s'élever au-dessus du niveau d'amont. Ce système ne paraissant devoir être étudié que pour des niveaux très variables, il sera convenable qu'on puisse changer la hauteur à laquelle sera cette surface. Le sommet du tuyau partiel qui s'enfoncera au-dessous du niveau du bief supérieur sera animé d'une certaine vitesse, de sorte qu'il tendra à se rapprocher de l'eau qui y sera déjà entrée. Il faut, pour que les conditions soient bien remplies, que la vitesse de cette eau puisse changer de direction et devenir assez sensiblement égale à celle du tuyau partiel, c'est-à-dire relativement à son axe courbe.

La colonne liquide dont il s'agit doit d'abord être réduite au repos en vertu de son ascension. On conçoit donc que, si alors elle n'est point parvenue au sommet de ce tube, celui-ci qui descendra pendant qu'elle redescendra elle-même, pourra avoir une vitesse combinée de manière que son sommet atteigne la colonne liquide en temps convenable. Si les dimensions de l'appareil et les vitesses sont bien combinées, son orifice latéral supérieur pourra alors s'engager derrière la surface courbe précitée, de sorte qu'il descendra plein ou à très peu près.

Pour bien se rendre compte des effets dont il s'agit, il est intéressant d'étudier un peu les détails.

Si les pressions latérales peuvent être diminuées en moyenne à cause du mouvement oscillatoire, ainsi que cela a été expliqué dans la première partie, pages 158 et suivantes, il pourrait sembler au premier aperçu qu'il y aurait en principe quelque désavantage dans ce mode d'introduction de l'eau. Mais la quantité de travail qui ne sera pas employée d'abord à pousser directement la roue, se retrouvera plus ou moins dans l'ascension de l'eau au-dessus du niveau d'amont. De sorte qu'en définitive, ce principe n'est pas défectueux. Mais il faut tenir compte de quelques résistances

passives dont l'expérience seule peut donner la valeur exacte.

Quand le tuyau partiel se dégagera du coursier dans le bief d'aval, l'eau qu'il contiendra conservera la vitesse de la roue tant que son extrémité postérieure ne sortira pas du coursier. A partir de cette époque, si l'autre extrémité de ce tuyau est sortie de l'eau d'aval, il s'élèvera de l'eau au-dessus du niveau du bief d'aval, ce qui diminuera la vitesse de la colonne liquide. Il sortira donc une partie de l'eau par l'extrémité inférieure.

Il y a deux choses à considérer, quant à la résistance que peut rencontrer la roue dans le bief d'aval : 1° il faut tenir compte de la pression qui résulterait de celle de l'eau de ce bief si la roue était en repos. Or, l'état d'oscillation dans les limites exposées pages 158 à 183 peut sans doute être une cause de diminution dans la pression latérale moyenne. Il y a donc lieu de penser que, toutes choses supposées égales d'ailleurs, les oscillations de la colonne liquide en aval du coursier ne seront pas sans avantage, en occasionnant quelque diminution de pression au bas de la roue.

On conçoit même que s'il y avait un commencement de seconde oscillation remontante, il pourrait se présenter des diminutions de pression plus ou moins analogues à celle qui a été signalée dans certaines roues à réaction, où l'eau entre de dehors en dedans, outre ce qui a été dit p. 920.

2° Il faut tenir compte de la vitesse avec laquelle la roue peut frapper, soit l'eau du bief d'aval, soit la colonne liquide dont je viens de parler, si l'on considère ainsi le tuyau partiel.

Supposons pour un instant la roue immobile, la vitesse de la colonne liquide étant dirigée de haut en bas dans le sens de l'ouverture inférieure de ce tuyau. Supposons aussi que l'aube présentât à cette hauteur une surface parallèle à l'axe de la roue, cette surface étant plane et tangente à la circonférence de cette roue, cette extrémité ne recevrait aucune

percussion de la colonne liquide du tuyau partiel, sauf le frottement.

Il paraît d'après cela que la résistance provenant de la vitesse avec laquelle cette colonne liquide sera rencontrée par la surface dont il s'agit, ne peut pas, quand on considère le mouvement relatif de la colonne liquide le long d'un axe courbe, avoir beaucoup d'importance, si la longueur du tuyau partiel est assez grande par rapport à son épaisseur dans le sens du rayon de la roue. Il y a lieu d'espérer, en réunissant cette considération à celles qui ont été présentées ci-dessus, que cette manière de faire dégager l'eau en aval aura de l'avantage quand la roue se trouvera notablement plongée dans l'eau du bief inférieur, tandis que la vitesse avec laquelle se dégageait cette eau était en général perdue dans les anciennes roues précitées.

On a supposé, pour simplifier les explications, que la forme générale connue de ces anciennes roues dont le coursier était toujours plein était celle qui a été indiquée par Ducrest, où l'on avait d'ailleurs disposé la partie supérieure du coursier de manière à éviter la contraction de la veine liquide. Mais les principes précédents peuvent être appliqués à une autre forme.

Au lieu d'entrer par devant, le liquide peut entrer latéralement. L'eau, pour la forme précédente, presserait l'axe de la roue, tandis que ses pressions seraient assez sensiblement équilibrées par celles qui agiraient contre un second fond courbe. L'eau entrant alors latéralement, au lieu de considérer des *surfaces courbes* formant coursier, on n'aurait plus à considérer pour cela que des *surfaces planes*.

Il est facile de voir que les considérations précédentes pourraient être appliquées dans cette hypothèse, et que, si l'eau entrait de chaque côté de la roue, les diverses pressions seraient en définitive contrebalancées, c'est-à-dire de manière à ne pas se reporter du moins trop sensiblement sur l'axe. Mais la roue ne pourrait pas à beaucoup près être

aussi large que pour la forme indiquée ci-dessus, et qui même aurait dans certaines limites quelques avantages quant au mode de distribution des pressions sur l'axe, celles qui tendraient à la soulager pouvant être plus grandes que celles qui tendraient à la pousser latéralement.

La difficulté de varier le débit des roues de côté coulant à plein coursier paraît être ce qui en a le plus restreint l'emploi. Quant à la seconde forme que je viens d'indiquer, il est à peine nécessaire d'ajouter que la roue ayant, comme je l'ai dit, deux fonds courbes pleins concentriques, pourrait être disposée entre deux murs parallèles barrés par un mur en amont. Les deux murs perpendiculaires à l'axe de cette roue seraient percés chacun d'un orifice dont la forme différerait peu de celle d'une portion des faces planes de la roue. Chacun de ces orifices servant à introduire l'eau motrice serait convenablement évasé de manière à éviter autant que possible la contraction des veines liquides.

Sans entrer ici dans d'autres détails, j'ai seulement voulu donner un exemple de plus des applications qu'on pourrait faire des propriétés des colonnes liquides oscillantes. Je ne dissimule pas les difficultés pouvant provenir notamment des frottements pour les diverses formes qui peuvent être proposées. Quant à la seconde, si l'on pouvait sans trop de difficulté pratique faire mouvoir parallèlement à elles-mêmes des couronnes, disposées verticalement de manière à diviser la roue en deux parties, on pourrait, en les écartant ou en les rapprochant l'une de l'autre, varier au besoin le débit de l'eau motrice. On sait qu'il y a des turbines dont une des faces, pouvant se mouvoir parallèlement à elle-même, permet d'en varier le débit. Il ne s'agit, au reste, dans ce chapitre que d'une exposition de principes, sur l'utilité pratique desquels l'expérience seule pourra prononcer. D'ailleurs, pour la seconde forme, il faudrait, comme je l'ai déjà indiqué, que la roue ne fût pas trop large.

NOTES

SUR LES

ROUES A LAMES LIQUIDES

OSCILLANTES

SUIVIES DE RECHERCHES HISTORIQUES

J'ai présenté à l'Académie des sciences, le 16 novembre 1863, une Note qui a été imprimée dans le *Compte rendu* de la séance du 21 décembre de la même année, sur la proposition de M. le général Poncelet. Dans cette Note, j'avais indiqué, avec une extrême réserve, le principe d'une *turbine à lames liquides oscillantes*, pensant qu'il l'avait peut-être signalé avant moi, et mentionnant d'ailleurs les aubes courbes que M. D. Girard a proposé de disposer sous les wagons d'un chemin de fer. Mais ce savant général, auquel je pris le parti de soumettre mes doutes relativement à la priorité de cette idée sur les lames liquides oscillantes par ascension le long des aubes courbes d'une roue horizontale, me fit l'honneur de me répondre, le 14 décembre de la même année, qu'il n'avait pas connaissance que personne en eût fait la proposition formelle. Je crois donc intéressant d'entrer dans quelques détails sur ce que je lui avais d'abord soumis.

En réfléchissant à deux turbines remarquables dessinées dans un ouvrage intitulé : *Theatrum machinarum novum*, *per Georgium Andream Bocklerum*, *architectum et ingeniarium,*

traduit de l'allemand en latin par Schmitz, Cologne, 1662, *pl. XLIV* et *L*, où l'eau semble s'élever sur les aubes courbes, et agir ensuite pendant un glissement de haut en bas, j'ai eu la pensée de la disposition dont il s'agit.

On sait que la roue verticale à aubes courbes de M. Poncelet est une véritable machine à lames liquides oscillantes, et qu'il a considéré ensuite cette roue verticale comme posée horizontalement, mais alors sans oscillations.

Il faut d'abord étudier une forme analogue à celle de la roue horizontale de Borda, mais en faisant arriver l'eau motrice par dessous au lieu de la faire arriver par dessus, et en disposant la courbure des aubes de manière que l'eau y entre d'une façon analogue à ce qui se présente pour la roue verticale à aubes courbes de M. Poncelet, avec cette différence que les aubes restent toujours à la même hauteur, ce qui simplifie un peu la théorie, tout en permettant d'appliquer à cette circonstance une partie des études faites sur cette roue verticale à aubes courbes. Il y a des différences provenant des effets de la force centrifuge; mais on peut les atténuer en disposant les aubes courbes entre des cloisons cylindriques verticales concentriques, auxquelles on pourra provisoirement supposer perpendiculaire la génératrice de chacune de ces aubes, en attendant des recherches ultérieures. Si les études faites sur les roues verticales à aubes courbes suffisent pour donner une idée de la disposition générale, le cas n'est cependant pas tout à fait le même. Selon que le diamètre de la turbine sera plus ou moins grand, il y aura sans doute des modifications à faire. Je remarquerai seulement ici une propriété dont la roue verticale ne semblait pas en général susceptible.

L'eau peut entrer en même temps par plusieurs aubes au moyen de *conducteurs fixes*, d'autant plus nombreux que le diamètre de la turbine est plus grand, toutes choses égales d'ailleurs. Si l'expérience seule peut montrer quel sera le nombre de *conducteurs* le plus convenable pour chaque dia-

mètre, les études déjà faites sur les mouvements de l'eau dans les roues verticales à aubes courbes jetteront beaucoup de jour sur cette question.

Il n'est peut-être pas inutile, au reste, de remarquer que si dans ces roues verticales il n'est pas en général tout à fait rigoureux de considérer l'eau comme sortant aussi bas qu'elle est entrée, cela sera rigoureux dans la turbine à lames liquides oscillantes si l'axe est bien vertical. Quant au nombre d'aubes qui dans chaque circonstance devraient se trouver entre deux conducteurs fixes, les observations qui ont été ou seront facilement faites sur les roues verticales à aubes courbes permettraient sans doute de lever toute difficulté sérieuse sur les points essentiels à étudier pour diminuer le nombre des turbines dans les circonstances où l'on aura beaucoup d'eau motrice à sa disposition. Si cette turbine peut avoir ses avantages pour des vitesses de rotation différentes de celles des turbines où l'eau entre par dessus, on va voir comment elle doit être modifiée pour qu'il ne retombe pas d'eau sur celle qui monte encore. Je n'y attache d'ailleurs aucun amour-propre, reconnaissant que, si elle est utile, l'honneur doit en revenir principalement à M. Poncelet.

Voici la copie d'un passage de sa lettre du 14 décembre 1863 :

« A l'égard de la question que vous voulez bien, Monsieur,
« me poser concernant les lames oscillantes par ascension le
« long des aubes courbes verticales d'une roue horizontale,
« je ne sache pas que personne en ait encore fait la proposi-
« tion formelle. »

On sait que je me suis beaucoup occupé de l'histoire de l'hydraulique. M. Poncelet m'écrivit à ce sujet, le 2 juillet 1862, une lettre dont l'extrait suivant suffira pour rappeler l'importance qu'il attachait à mes recherches :

« J'ai l'honneur de vous retourner, selon vos désirs, la Note
« que vous m'avez adressée, et qui est relative aux turbines
« plus ou moins analogues à celle que j'ai moi-même ima-

« ginée en 1823, et dont j'ai donné la théorie dans mes leçons « de 1826 à l'Ecole de Metz. Je ne vois absolument aucun in- « convénient à ce que vous publiiez vos opinions et jugements « à cet égard, et je demeure d'avis, comme à l'époque de nos « dernières entrevues, que vous rédigiez sur l'ensemble des « remarques historiques que vous avez faites sur l'hydraulique « en général *un livre qui, je n'en doute pas, sera favorable-* « *ment accueilli du public et de l'Académie, sans en excepter* « *même les derniers inventeurs plus ou moins autorisés à prendre* « *un aussi glorieux titre.* »

Principes d'une turbine à double couronne mobile et à lames liquides oscillantes; Considérations sur les roues verticales à aubes courbes.

Cette roue se compose de deux turbines concentriques, analogues à celle de Borda, mais ne formant ensemble qu'une seule pièce mobile. L'eau entrera de bas en haut dans celle dont le diamètre est le moindre. Elle sortira latéralement par le sommet des aubes courbes de celle-ci pour entrer dans celle dont le diamètre est le plus grand. C'est par cette dernière qu'elle doit sortir du système après avoir agi sur les aubes courbes, soit en montant, soit en descendant.

Ces aubes par lesquelles l'eau doit sortir peuvent, pour faciliter sa sortie, avoir dans la couronne extérieure une disposition notablement différente de celle des aubes qui servent à la faire entrer.

Pour faire comprendre comment l'eau peut passer de la première couronne dans la seconde, je suppose d'abord (ce qui sera précisément un des cas possibles) la hauteur de chute et le diamètre de la turbine tels que la force centrifuge diffère peu en moyenne de la pesanteur pour chaque

molécule d'eau considérée. Dans l'hypothèse dont il s'agit, il est facile de voir que l'ascension de l'eau, en vertu de la vitesse acquise restante, quand chaque molécule arrivera dans la première couronne à la hauteur où l'on veut qu'elle tende à se transvaser, pourra être plus que suffisante pour que la force centrifuge, assez sensiblement égale à la pesanteur dans cette hypothèse, ait le temps de faire passer toute l'eau de la couronne intérieure dans la couronne extérieure.

Quant à la perte de force vive résultant de la vitesse latérale, dans le sens du rayon de la roue, par suite de la seule action de la force centrifuge, il est clair que, si la largeur des couronnes est petite par rapport à la hauteur de chute motrice, cette perte ne sera qu'une petite fraction de la chute.

Ce que je viens de dire a seulement pour objet de faire comprendre la possibilité du jeu de l'appareil dans une des circonstances qui peuvent être proposées. Mais on pourrait transvaser l'eau d'une couronne dans l'autre par un moyen différent quand elles ne seraient pas trop larges.

Il y aurait une cause de perte de force vive plus importante sans doute que l'avantage de faire sortir l'eau par des orifices différents de ceux par lesquels elle est entrée, si, pour la transvaser d'une couronne à l'autre, on faisait plier le sommet de la lame liquide au moyen de surfaces courbes disposées à son sommet dans la couronne intérieure, sans prendre des précautions particulières. Mais on peut, même dans un coude à angle droit brusque, réduire à très peu de chose la résistance de l'eau en mouvement, au moyen de lames courbes concentriques. Il est facile d'en conclure que, dans certaines limites du moins, on peut, en employant ces lames courbes concentriques, transvaser l'eau de la couronne intérieure dans la couronne extérieure, quand même on ne tiendrait pas compte de l'effet précité de la force centrifuge.

Je dois convenir que sans la roue à augets à grandes vitesses de M. Poncelet, je n'aurais pas pensé à faire sortir l'eau par un orifice différent de celui par lequel elle est entrée,

pour les circonstances où l'on voudrait, comme ci-dessus, employer dans une turbine un mode d'introduction de l'eau par ascension.

Ce qui change l'état de ces questions, c'est surtout l'emploi des lames courbes concentriques qu'il ne faut pas confondre avec les conducteurs destinés à faire entrer l'eau sous certains angles. Il semble au premier aperçu qu'il faut pour cela que les aubes aient très peu de largeur, parce qu'il est convenable que la vitesse de l'eau, quand elle arrivera aux lames concentriques, soit assez petite. Or, si les aubes ne sont pas très étroites, il faut que l'eau puisse monter à une hauteur notable pour remplir les espèces de siphons formés par les lames supérieures. Mais pour composer de véritables siphons, il suffit de les terminer latéralement par des cloisons verticales. Si, avant de mettre l'appareil en train, on a amorcé tous ces siphons de bas en haut une première fois, quand la roue aura été mise en mouvement suffisamment régulier, il suffira que l'eau, en arrivant à ces lames concentriques, conserve une vitesse assez petite pour pouvoir passer. En effet, l'eau, contenue dans la seconde branche de chaque siphon, contrebalancera par sa succion le poids de l'eau contenue dans la première. Il est bien entendu que ces lames courbes concentriques ayant toute la largeur de chaque aube, ne devront pas couvrir entièrement l'espace compris entre les sommets de deux aubes consécutives. Elles devront laisser à l'air la liberté de circuler sur chaque lame liquide, de manière à éviter l'engorgement, qui existera à l'époque de la mise en train; mais bientôt en vertu de la communication latérale du mouvement, l'origine de chaque veine liquide se trouvera sans doute assez convenablement débarrassée. Je suppose pour un instant que les lames concentriques n'existassent point, et que la roue fût tenue immobile, il y aurait évidemment une couronne de jets d'eau, dont la vitesse diminuerait graduellement, d'une manière plus ou moins analogue à ce qui se passe dans les jets d'eau ordinaires, dont le sommet s'é-

largit. Si la roue prend de la vitesse, la hauteur de ces jets d'eau diminuera par la raison même qu'ils produiront du travail en agissant contre les aubes courbes. Or, il s'agissait de trouver un moyen de se débarrasser de la quantité d'eau arrivant à leur sommet, de manière à l'utiliser par sa descente dans une couronne concentrique, quand cela ne serait qu'afin de permettre d'introduire l'eau motrice par toute ou presque toute la circonférence de la roue de manière que les conducteurs, amenant l'eau dans celle-ci, donnassent lieu à un écoulement assez régulier, l'inertie du liquide ayant été vaincue une première fois. Cette combinaison me paraît mériter d'être signalée, quoiqu'elle soit moins simple que la turbine de Borda. (Voir l'année 1767 des mémoires de l'Académie des sciences, p. 270 à 283, pl. 5.) On a étudié une disposition des aubes analogues à celles de Borda, permettant de faire ce qu'on appelle maintenant une *turbine verticale*, c'est-à-dire à axe horizontal. Pour des limites où il peut être convenable de conserver l'emploi des roues verticales dites à *la Poncelet*, il est intéressant d'étudier la disposition précédente. Dans une pièce justificative reproduite page 932, j'ai rappelé qu'on ne tenait pas compte en général dans la théorie des roues à la Poncelet, pour les conditions où elles donnent le maximum de rendement, de la différence de niveau qui peut exister entre les entrées et sorties de l'eau. Dans le cas où la chute motrice serait trop grande pour qu'on pût se dispenser d'en tenir compte, selon une remarque dont je dois la communication à M. Boileau, cela permettrait de distinguer plus spécialement le principe de la turbine, objet de ce chapitre, même abstraction faite des moyens que je propose pour faire sortir l'eau; car il paraîtrait en résulter qu'elle serait applicable à des chutes plus grandes que celles qui peuvent convenir aux roues à la Poncelet.

Je suis un de ceux qui ont présenté il y a longtemps des résultats de calculs sur une disposition de roues verticales à aubes courbes, dans laquelle l'eau entre de haut en bas.

Société Philomathique. — Séance du 11 décembre 1847.

«... Un des inconvénients des roues qui marchent par l'action directe du poids de l'eau, consiste en ce qu'elles ne font qu'un petit nombre de tours dans un temps donné. J'ai eu depuis longtemps la pensée de considérer le tympan de Lafaye, machine à élever de l'eau au moyen de canaux courbes, qui soulèvent le liquide à la hauteur de l'axe, comme pouvant être transformé en moteur hydraulique, recevant au contraire l'action d'une chute d'eau à la hauteur de cet axe. Je suis dernièrement revenu sur ce sujet, à cause de la propriété que me paraît offrir ce système convenablement modifié de marcher avec des vitesses encore plus grandes que la roue verticale à aubes courbes de M. Poncelet. On conçoit que, si un tuyau d'un diamètre suffisant est disposé au centre de la roue, d'une manière analogue à celui du tympan, les orifices ou les conducteurs étant disposés d'une manière convenable, on peut amener l'eau d'une hauteur beaucoup plus grande que celle de l'axe.

« On sait que les roues à augets, proposées par de Thiville, recevaient l'eau à l'intérieur de la roue au lieu de la recevoir à l'extérieur. On peut disposer des roues à aubes courbes d'une manière analogue, pour appliquer le principe dont je viens de parler. L'idée consiste à faire descendre l'eau sur les aubes courbes au lieu de l'y faire monter en l'introduisant de bas en haut. Je reviendrai sur la théorie de ces roues et sur les détails de construction, les considérations auxquelles on est conduit étant assez délicates. »

Séance du 22 janvier 1848.

« M. de Caligny a communiqué l'année dernière à la Société une roue verticale à aubes courbes, recevant l'eau de haut en bas. Il fait observer aujourd'hui que, du moins pour les diamètres d'une grandeur suffisante, la théorie de cette roue diffère très peu de celle des roues..... de Borda, même quand le liquide entre latéralement, au lieu d'entrer à l'intérieur, d'une manière analogue à ce qui se présente dans la roue à augets de de Thiville. .

« ... Il y a, il est vrai, une difficulté de plus relativement à la sortie de l'eau, si l'on tient compte du mouvement d'entraînement des aubes courbes. Mais on sait que, pour les roues d'un assez grand diamètre, on ne tient pas compte de cette circonstance dans la théorie des roues verticales à aubes courbes de M. Poncelet.

« ... Pour les chutes d'eau peu variables, le liquide pouvant sortir sans que le bas de la roue soit plongé, on n'aura point

à s'embarrasser du dégagement de l'air entre les aubes, d'une manière bien sérieuse. Alors la théorie est plus simple que celle de la roue verticale à aubes courbes de M. Poncelet... »

La reproduction de ces deux extraits a spécialement pour but de préciser l'exposition des principes de ces nouvelles roues verticales, dont j'ai appris qu'on s'était occupé avant moi. Elles sont aujourd'hui modifiées et employées dans l'industrie.

Pour compléter ce que j'ai à dire sur les modifications des turbines, j'ajouterai l'extrait suivant de ma note précitée du 17 mai 1851 sur les cloisons courbes concentriques disposées dans les coudes, publiée aussi par le journal l'*Institut*.

.....Les appareils de mon invention ne sont pas les seuls auxquels l'idée fondamentale de ces cloisons courbes sera applicable. Ainsi il y a des turbines où l'eau arrive en se détournant à angle droit, et où il sera possible de diminuer la perte de travail qui en résulte, en divisant la colonne affluente en plusieurs compartiments par des conducteurs fixes. On conçoit comment cela peut se faire au moyen de surfaces fixes analogues à des pavillons de trompette rentrant les uns dans les autres de manière à former des tuyaux annulaires recourbés convenablement à leurs parties inférieures ou supérieures pour présenter des phénomènes de nappes liquides occasionnés par des coudes, d'une espèce nouvelle, mais qui rentreront, quant aux principes essentiels de la résistance, dans le système de ceux qui font l'objet de cette note.

Considérations nouvelles sur des turbines décrites et figurées dans quelques ouvrages du XVIe siècle.

Parmi les roues hydrauliques décrites, en 1588, dans un ouvrage de Ramelli, intitulé : *Le diverse ed artificiose machine, etc.*, il y en a dont les aubes sont de véritables sur-

faces cylindriques à génératrices verticales qui, au premier aperçu, ont beaucoup de ressemblance avec celles d'une turbine de M. Poncelet. Ainsi, dans celle de la *figure* 3, p. 5, le canal conducteur amène l'eau motrice presque tangentiellement à l'élément extérieur de la courbure de chaque aube.

Mais, comme la surface de chaque aube se prolonge jusqu'à l'axe vertical de la roue, la veine liquide au centre de cette roue ne s'échappe pas de la même manière. En général, l'aspect de cette ancienne turbine a de l'analogie avec celui d'une roue à rayons divergents, tandis que la courbure des aubes tend à se raccorder avec la circonférence extérieure dans les leçons lithographiées de M. Poncelet, où il est d'ailleurs à remarquer qu'à l'intérieur de la roue, les aubes se recourbent en arrière. Aussi, cette turbine, décrite par Ramelli, offre, même à la simple vue, un caractère tout différent. Il est essentiel d'observer que les aubes de Ramelli ne sont point comprises entre deux plateaux, dont un est d'ailleurs percé au centre dans le système de M. Poncelet.

Ce dernier caractère est assez bien exprimé dans un dessin très curieux de la *planche XVI* d'un ouvrage in-folio, publié à Venise vers la fin du XVIe siècle ou au commencement du suivant, intitulé : *Fausti Verantii machinæ novæ, addita declaratione latina, italica, gallica, hispanica et germanica.* Dans cette turbine, les aubes courbes ne vont plus jusqu'à l'axe, et se raccordent mieux avec la circonférence extérieure que dans la turbine précitée décrite par Ramelli. Elles sont comprises entre deux plateaux parallèles auxquels elles sont attachées. Le plateau supérieur est plein, l'inférieur est percé au centre dans l'espace libre laissé par les aubes ; il semble bien du moins, d'après le dessin, que, dans ce plateau inférieur, le cercle compris entre les aubes est entièrement enlevé.

Quant au nombre de ces aubes, s'il est évidemment trop petit, il ne paraît pas que, dans la pensée de l'auteur, ce dessin suffise pour déterminer rigoureusement ce nombre,

car il y a plus d'aubes dans le moulin à vent de forme analogue décrit dans le même ouvrage. Il est vrai que, dans le moulin à vent dont il s'agit, le fluide ne peut sortir par-dessous. Il ne paraît pas, d'ailleurs, que le but de cette turbine, dans le cas particulier représenté par l'auteur, soit précisément le même que celui de la roue précitée décrite par Ramelli, dans laquelle l'eau était amenée sur chaque aube successive par un *conducteur fixe*, disposé extérieurement. Le dessin de cette seconde turbine ne présente plus de conducteur, et la figure de la *planche XVI* précitée porte seulement pour titre : *Molæ ad rupem appensæ*. Dans cette figure, l'auteur n'indique pas d'autre but que de montrer simplement de quelle manière on peut établir une roue sur le flanc d'un rocher, c'est-à-dire en laissant plonger l'axe vertical à une profondeur convenable dans une rivière qui coule au pied de ce rocher, à un niveau qui peut varier, et dont le mouvement suffit pour faire tourner cette roue, quoiqu'elle y soit entièrement plongée. On peut même se demander, surtout en comparant le dessin de cette roue à celle du moulin à vent précité, si, dans la pensée de l'auteur, le plateau inférieur doit être réellement percé au centre, et s'il n'y a pas en ce point une erreur dans le dessin. On sait, en effet, que M. Cagniard de Latour a fait des expériences sur une turbine de forme analogue, dont les aubes étaient perpendiculaires à deux plateaux pleins et parallèles, et qui tournait aussi entièrement plongée dans une rivière.

L'auteur précité, le savant évêque Veranzio, connaissait probablement l'ouvrage de Ramelli, car, d'après diverses recherches, quoique la date précise de la publication de son ouvrage dont il s'agit ne se trouve point sur les exemplaires que j'ai eus entre les mains, il ne paraît pas qu'elle puisse être antérieure à 1591, ni même probablement à 1595.

Ces deux auteurs ne disent ni l'un ni l'autre si les appareils dont il s'agit sont de leur invention; il y a même lieu de croire qu'ils regardaient la question comme ayant été pré-

sentée sous des formes assez diverses pour ne pas considérer chaque figure séparée comme exprimant toute la portée du système.

L'ouvrage de Faust Veranzio étant traduit en cinq langues, il y a eu par hasard une transposition dans le texte français de la note relative à cette roue ; mais les textes des quatre autres langues étant parfaitement d'accord entre eux, comme je l'ai vérifié, il n'y a pas à s'y tromper. L'auteur était, ainsi que Ramelli, un des hommes les plus savants du XVIe siècle. Ce sont les seuls qui, à ma connaissance, aient publié, avant M. le général Poncelet, des roues à aubes courbes, à axe vertical, ces aubes ayant des génératrices verticales, et leur courbure se raccordant plus ou moins avec la direction que peut avoir l'eau affluente à la circonférence extérieure, car il ne faut pas les confondre avec les turbines dont les aubes avaient aussi des génératrices verticales, mais dont la courbure était évidemment destinée à recevoir un choc, même quand cette courbure était repliée en arrière, vers l'intérieur de la roue, comme dans une figure du grand ouvrage de Belidor.

Quant aux conducteurs fixes amenant l'eau motrice horizontalement par toute la circonférence extérieure d'une roue à aubes et à axe vertical, j'ai signalé depuis longtemps la roue horizontale à aubes planes d'Adamson, qui recevait l'eau par toute sa circonférence extérieure (*Philosophical Magazine*, t. L., et *Journal of Arts and Sciences*, t. IV). Cela ne se rapporte pas à la turbine de M. Poncelet, qui n'a pas proposé, je crois, de faire arriver l'eau par toute la circonférence, mais plutôt de n'employer, en général, qu'un seul conducteur. Je passe donc au point le plus essentiel, quant à la marche de l'esprit humain dans la découverte des principes.

On demandera sans doute si les savants précités du XVIe siècle ont eu une idée sérieuse du bon emploi de la force vive, tel qu'il est compris aujourd'hui dans les turbines.

Leurs textes sont trop succincts pour qu'on puisse répondre à cette question d'une manière positive; il y a cependant une circonstance sur laquelle je crois devoir appeler l'attention des érudits, même pour le cas où quelque ancien ouvrage ne me serait pas assez connu. Je ne trouve pas qu'aucun des auteurs des deux derniers siècles ait reproduit les formes si remarquables des aubes de Ramelli et de Faust Veranzio. Il est même facile de voir qu'ils préfèrent tous l'emploi du choc proprement dit sur les espèces de cuillers offrant même, en général, des surfaces gauches. Belidor et Borgnis lui-même n'ont point rappelé les deux anciennes dispositions précitées des aubes courbes, dont il y a par conséquent lieu de penser que les auteurs ont eu une idée qui n'était encore généralement comprise ni de leur temps, ni même dans les deux siècles qui les ont suivis, c'est-à-dire jusqu'aux savantes recherches d'Euler et de Borda, dont il est d'ailleurs à remarquer que les aubes courbes avaient des dispositions très différentes.

Je citerai seulement ici, relativement aux aubes à surfaces gauches, l'ouvrage précité de Bockler, dont j'ai déjà mentionné les *planches XLIV* et *L*. On voit, sur ces deux planches, l'eau arriver latéralement d'une manière telle, qu'il semble difficile que l'auteur n'ait pas eu une idée quelconque de l'avantage indiqué dans le siècle suivant par de Parcieux, consistant à utiliser en partie l'ascension de l'eau le long des aubes d'une roue hydraulique. Cet ouvrage est d'ailleurs le seul jusqu'à présent où j'aie retrouvé quelque chose d'analogue à la disposition de la turbine précitée de Ramelli, quant à la forme. Mais il y a au fond une différence très curieuse qui change tout à fait l'état de la question. Le fluide, au lieu d'arriver par la circonférence extérieure pour sortir par le centre, arrive en entier par dessous, les aubes courbes étant attachées à un plan supérieur plein auquel elles sont perpendiculaires. Le fluide, après avoir produit son action, sort, dans ce système, par la circonférence exté-

rieure de la roue. Le dessin de cette roue se trouve dans la *planche LXXXI*, qui représente une turbine éolique ayant pour moteur un courant d'air chaud. Si ce système se rapporte à l'histoire de turbines différentes de celles dont j'ai parlé ci-dessus, il ne détruit pas la conséquence que je viens d'indiquer comme résultant du silence des auteurs des deux derniers siècles sur les dispositions remarquables des aubes de Ramelli et de Faust Veranzio.

Parmi les formes curieuses des anciennes turbines, il est intéressant de signaler celle de Jacques Besson, dont l'ouvrage est du XVIe siècle et qui a été reproduit sous diverses formes par des auteurs français et allemands. En effet, un érudit a cru y voir seulement un tambour entouré d'aubes de formes héliçoïdes; mais en y regardant de plus près, je me suis aperçu que c'était une erreur, et qu'il s'agissait d'une sorte de roue à surface conique dont la pointe est tournée vers le bas, et qui est plus ou moins renflée selon les divers auteurs qui en ont parlé. Il est bon d'être prévenu, parce qu'on ne s'en aperçoit pas toujours, que dans ces anciens auteurs les dessins offrent quelquefois l'aspect d'une sorte de déchirure, qui permet de pénétrer par la pensée dans l'intérieur de ces anciennes machines.

Principe d'une roue hydraulique élévatoire.

L'ouvrage précité de Bockler renferme plusieurs roues élévatoires à augets invariablement attachés à ces roues; mais on en trouve un perfectionnement remarquable dans le *Theatrum machinarum*, de Leupold, publié longtemps après, le tome Ier de ce dernier étant de 1723. On y voit le dessin d'une roue élévatoire dont les augets prennent l'eau à élever par la circonférence extérieure et la versent au sommet par la circonférence intérieure. La forme générale du système est d'ailleurs analogue, sauf quelques détails qui s'expliquent

par la différence des problèmes à résoudre, avec la roue verticale motrice à augets, proposée par de Thiville, qui a eu l'heureuse idée de recevoir, dans certains cas, l'eau motrice à l'intérieur, et de la faire sortir par la circonférence extérieure, de manière à permettre aux augets, convenablement disposés pour cet objet, de garder l'eau le plus longtemps possible avant de la verser au bief d'aval.

Il est permis de s'étonner qu'on ait été si longtemps à transformer cette roue élévatoire, décrite par Leupold, en roue hydraulique motrice, puisqu'il semble qu'il ne s'agissait guère que de changer le sens de son mouvement. Mais ces généralisations, conséquences de l'esprit moderne, dont j'ai donné divers exemples à la Société Philomathique de Paris, ne diminuent pas au fond le mérite des anciens auteurs, et même de Thiville ne doit probablement que bien peu de chose à Leupold.

J'ai eu moi-même occasion de communiquer, à la Société Philomathique de Paris, en 1846, le principe d'une roue verticale élévatoire à aubes courbes dont il me parait intéressant de conserver la trace, quoique l'expérience seule puisse montrer quel peut être son degré d'utilité. Ce sera d'ailleurs un exemple de plus des avantages que l'on peut retirer de la lecture des anciens auteurs, même quand ces derniers ont présenté des combinaisons dont le défaut est aujourd'hui reconnu.

Ramelli a disposé verticalement la roue horizontale à aubes courbes dont j'ai parlé ci-dessus. Mais le nombre de ces aubes est alors évidemment trop petit; au reste, ce savant ingénieur voulait peut-être seulement exposer une idée. Il est bien à remarquer qu'il n'a point considéré cette roue verticale comme motrice, mais seulement comme un *propulseur* pour faire avancer des bateaux. Il semble, d'après cette disposition, qu'il voulait faire pénétrer chaque aube dans l'eau en diminuant le choc à son entrée, et qu'il comptait, en partie du moins, sur le poids de l'eau qui aurait été sou-

levée comme point d'appui pour faire avancer les bateaux. Ce n'est pas ainsi, comme on le sait, que ces propulseurs sont aujourd'hui considérés. Mais quand j'ai eu connaissance de cette ancienne roue, j'ai signalé l'avantage que pourrait avoir une forme analogue des aubes plongeantes pour élever de l'eau au moyen des roues de côté à aubes emboîtées dans un coursier, en diminuant le jaillissement du liquide.

J'ai cru depuis retrouver cette idée dans un grand ouvrage sur les moulins à vent hollandais, qui est à la bibliothèque du Conservatoire des Arts-et-Métiers, et qui a été publié, en 1734, in-folio. Je m'étais même empressé de le dire dans ma Note précitée de 1863, mais j'ai reconnu ensuite que je m'étais trompé à mon désavantage, n'ayant pas encore étudié le hollandais. Il est certain que la roue dont il s'agit est destinée à utiliser une chute d'eau. Mais ce n'est qu'une espèce particulière de roue de côté *motrice*, et la courbure des aubes n'est pas disposée de manière à utiliser la force vive de l'eau, comme dans la roue verticale à aubes courbes de M. le général Poncelet, où l'eau arrive par dessous, le coursier ayant une direction de bas en haut, ce qui est précisément favorable à l'établissement de la turbine à lames liquides oscillantes.

C'est peut-être un des exemples les plus convenables pour montrer qu'en supposant même que les anciens auteurs eussent disposé les aubes des roues de toutes les manières possibles, ce ne serait pas une raison pour en conclure qu'ils se soient doutés du parti qu'on en pouvait tirer pour le bon emploi de la force vive.

Le nouveau mode d'*évacuation* de l'eau dans des roues *motrices* à aubes courbes est le point le plus intéressant de ce chapitre. Mais il ne s'agit que de considérations théoriques dont l'expérience seule pourra montrer l'utilité. Aussi une double couronne avec lames courbes concentriques pouvant trop augmenter le poids de la roue à cause de la solidité qu'il faudra d'ailleurs donner à ces lames, il est douteux qu'un mode semblable d'évacuation pût être proposé pour une roue à aubes courbes verticale.

RÉALISATION EXPÉRIMENTALE

DE LA

MARCHE AUTOMATIQUE

DE L'ÉCLUSE DE NAVIGATION

A COLONNES LIQUIDES OSCILLANTES, SANS BASSIN D'ÉPARGNE NI SOUPAPE NI CATARACTE.

Depuis que le Mémoire de 216 pages, sur mon nouveau système d'écluse, par lequel commence la seconde partie, est imprimé, j'ai trouvé des moyens beaucoup plus simples que ceux que j'avais indiqués pour le faire fonctionner. La marche est maintenant entièrement automatique, sans qu'on ait besoin d'employer pour cela, ni bassin d'épargne, ni soupape, ni cataracte. J'aurais donné moins de dévéloppements que je ne l'ai fait à diverses parties de ce Mémoire, dont au reste il est intéressant de conserver la trace, si j'avais trouvé plus tôt les modifications que je vais décrire et qui ont été essayées avec succès à l'écluse de l'Aubois sans que ma présence sur les lieux ait été nécessaire.

Pour la vidange de l'écluse, au lieu d'élargir le tube d'aval immédiatement au-dessus de son anneau inférieur, on aurait pu lui donner un diamètre à peu près égal à celui de l'arête inférieure de son anneau, et n'augmenter ce diamètre qu'à partir d'une certaine hauteur au dessus. Il en serait résulté

que les premières oscillations en retour, descendant assez bas pour abandonner la partie élargie du tube, auraient permis à un contrepoids de le soulever.

Cette forme du tube n'étant pas celle qui a été construite à l'écluse de l'Aubois, j'ai tourné la difficulté au moyen d'une pièce de bois convenablement équilibrée. Sa section différait assez peu de celle de la colonne liquide annulaire, comprise entre la paroi du tube existant et une surface cylindrique verticale, passant par l'arête inférieure de l'anneau qui repose alternativement sur le caoutchouc. Il est facile de voir que si l'eau était en repos, les pressions de haut en bas sur l'anneau inférieur, et de bas en haut contre la pièce de bois, seraient compensées de manière que les choses auraient été, quant aux pressions hydrostatiques, analogues à ce qui se serait présenté, si le tube d'aval avait été rétréci, comme je viens de l'expliquer, jusqu'à une certaine hauteur.

Pour la première oscillation descendante, le tube se lève dans l'instant de repos par lequel se termine cette oscillation, à la période suivante, il ne se lève que lorsque l'eau est descendue plus bas. Plus les périodes s'éloignent de la première, plus la colonne liquide a le temps de descendre avant qu'il se lève. Cela dépend de plusieurs raisons, reposant en général sur ce que la vitesse de l'eau dans les oscillations descendantes est de plus en plus grande. Il en résulte sur l'anneau inférieur une percussion de haut en bas d'autant plus notable que les vitesses dont il s'agit sont plus augmentées.

D'ailleurs l'inertie des pièces solides et de l'eau qu'elles doivent mettre en mouvement est une cause d'hésitation, qui permet à la colonne liquide de descendre plus bas que si le tube se levait instantanément. L'hésitation peut aussi provenir en partie de ce que, dès l'instant où le tube commence à être soulevé, il se présente une succion qui s'oppose jusqu'à un certain point à ce soulèvement. Or, si la colonne liquide s'écoule avec une certaine vitesse vers l'écluse, on conçoit que celle qui est contenue dans les tubes verticaux, ayant à

combler le vide qui tend à se faire, a le temps de descendre encore avant de s'écouler principalement au bief inférieur, quand le tube vertical ne fait que commencer à se soulever.

La pièce de bois a environ $2^m,50$ de haut, ses deux extrémités sont taillées en biseau, sur une longueur de $0^m,60$ au bas et sur une longueur beaucoup moindre au sommet, qui s'élève au-dessus du bief d'aval à une hauteur d'environ $1^m,50$. A la première oscillation descendante, le tube a commencé à se lever quand l'eau arrivait à $0^m,10$ environ au-dessus du sommet de la pièce de bois, à la suivante il a commencé à se lever quand l'eau était à $0^m,02$ au dessous, aux périodes suivantes il a commencé à se lever quand l'eau était de plus en plus bas. Les chiffres d'ailleurs observés d'une manière provisoire au-dessous de ce sommet ont été successivement $0^m,12$, $0^m,20$, $0^m,20$, $0^m,22$, $0^m,35$, $0^m,48$.

Il résulte de cette baisse successive du sommet de la colonne liquide, même avant l'instant où le tube commence à se soulever, que tout en ne laissant plus l'avantage de profiter des oscillations en retour autant qu'à l'époque où la manœuvre se faisait à la main, la cause de déchet provenant de cette circonstance est notablement atténuée, d'autant plus que la partie de la colonne liquide rentrée dans le tuyau de conduite est précisément la plus élevée. Il faut d'ailleurs tenir compte de ce que, si le tube marchait à la main, les premières oscillations en retour seraient loin de vider le tube jusqu'au niveau d'aval. Pour la première, il n'y aurait aucune différence dans la quantité d'eau perdue ainsi, et l'on a même l'avantage que donne toujours la précision des mouvements automatiques. Dans les dernières périodes, il ne restait guère qu'un mètre de hauteur d'eau au-dessus du niveau du bief inférieur quand le tube d'aval commençait à se soulever, et, ainsi que je viens de l'expliquer, cette colonne liquide n'était pas même entièrement perdue, à cause des effets résultant de la vitesse de l'eau dans le tuyau de conduite. Si la chute de l'écluse, pour laquelle cette observation a été faite, est d'environ $2^m,40$,

le centre de gravité de la colonne dont il s'agit n'étant qu'à 0^m,50 environ au-dessus du niveau du bief inférieur, on voit qu'il ne faut pas exagérer la perte de force vive résultant de la manière dont le tube d'aval achève de se vider, d'autant plus que cette colonne ne tombe qu'en partie au bief d'aval.

La pièce de bois avait d'abord été mise au centre du tube, c'est-à-dire que sa section était un triangle équilatéral de 0^m,34 de côté s'appuyant contre les croisillons du sommet; elle a été réduite à cette section, parce qu'on a retranché une planche de 0^m,02 d'épaisseur, ne sachant pas bien quelle était la largeur de la couronne occupée sur le caoutchouc par l'anneau du tube posé sur son siége, il paraît qu'il aurait un peu mieux valu ne pas retrancher cette planche pour l'opération de vidange. J'ai reconnu d'ailleurs qu'il valait mieux lui donner la forme d'un prisme quadrangulaire, et la poser contre la paroi qui est du côté du long tuyau de conduite, en lui donnant toute la largeur comprise entre deux des croisillons qui consolident les sommets des tubes, et la taillant de manière à ne pas laisser de jour entre elle et cette paroi. Pour se servir de ce qui était fait, on a posé la pièce de bois précitée contre la paroi dont il s'agit, en disposant les biseaux de la manière la plus convenable pour diminuer la résistance de l'eau. Il en est résulté que, le liquide sortant principalement du côté opposé de la paroi, la résistance occasionnée par la pièce de bois au mouvement de bas en haut a été bien atténuée de manière à ne pas nuire beaucoup à la force de succion qui ramène alternativement le tube sur son siège.

L'état actuel des portes d'aval de l'écluse de l'Aubois ne permet pas de faire d'expériences bien rigoureuses sur le rendement. Les caoutchoucs des siéges des tubes d'amont et d'aval devront être renouvelés la première fois qu'il y aura un chômage. Ils sont posés depuis si longtemps qu'ils perdent beaucoup d'eau. Les guides de ces deux tubes, surtout ceux de celui d'amont, sont aussi en trop mauvais état pour qu'on

puisse faire en ce moment des expériences définitives. Mais on a pu comparer les effets de la marche automatique à ceux de la marche à la main, de sorte qu'il ne paraît pas qu'il y ait une différence assez notable entre les rendements obtenus par ces deux moyens, dans l'état actuel des choses, pour ne pas pouvoir être attribuée à des erreurs d'observation. On avait d'abord levé le tube d'aval à $0^m,40$ environ, on a augmenté le rendement en réduisant sa levée à peu près à $0^m,25$.

Quand l'eau est en mouvement de haut en bas dans le tube d'aval, il semble résulter de la pièce de bois taillée inférieurement en biseau, que cette vitesse est une cause qui tend à empêcher ce tube de se relever; de sorte qu'il serait avantageux d'employer cette pièce de bois comme moyen de retarder cette ascension dans certaines limites, pendant les oscillations descendantes, d'après les considérations précitées. Cet effet s'ajouterait à celui de la percussion de l'eau au-dessus de l'anneau inférieur. Mais il paraît, d'après des expériences inédites, qui m'ont été communiquées par M. Bertin, que les phénomènes du mouvement de l'eau à l'extrémité postérieure des corps plongés diffèrent de ce qu'on admettait généralement, quant à ce qu'on appelait une *non-pression*, résultant du mouvement du liquide. Il est donc prudent de ne pas trop compter sur les effets de cette *non pression* pour le cas dont il s'agit.

Le point essentiel est d'ailleurs bien plutôt de signaler les conséquences de la percussion de haut en bas sur l'anneau inférieur; car il en résulte qu'en modifiant au besoin cet anneau et la pièce de bois, on pourrait faire en sorte que le tube d'aval se soulevât seulement aux instants où la colonne liquide serait descendue plus bas que dans l'état actuel des choses, soit pendant le remplissage, soit pendant la vidange.

La pièce de bois dont il s'agit peut d'ailleurs être utile pour continuer à obtenir la marche automatique dans le cas où les niveaux des biefs seraient trop variables. Il suffirait,

en effet, d'avoir un moyen simple de hausser ou de baisser cette pièce de bois, pour arrêter son sommet de la manière la plus convenable relativement à ces niveaux.

Avant de poser cette pièce on pouvait obtenir la marche automatique des dernières périodes de vidange. Pendant cette marche automatique, à l'instant où commençait la descente du tube d'aval, sa levée étant de $0^m,40$ environ, l'eau s'y est élevée pendant l'écoulement au bief inférieur à une hauteur de $0^m,34$ au-dessus du niveau de ce bief, pour une chute de l'écluse d'environ $2^m,40$. Quand on entendait ce tube toucher son siège, l'eau y était à $1^m,78$ au-dessus du même niveau. Il était intéressant de faire ces observations avant de déterminer la hauteur qu'on pouvait donner à la pièce de bois. On conçoit, en effet, que, pour assurer la stabilité du tube sur son siège, il est utile que la pièce de bois soit recouverte d'une couche d'eau suffisante pour que la pression de celle-ci l'empêche de se relever. On conçoit d'ailleurs que, la colonne liquide montant très vite, la pression dont il s'agit peut augmenter assez rapidement pour que le tube n'ait pas le temps de se relever, quand même cette couche d'eau n'aurait pas d'abord été assez épaisse. La même remarque serait applicable au cas où, la pièce de bois étant supprimée, on aurait à déterminer la hauteur à laquelle le tube d'aval pourrait, comme je l'ai indiqué ci-dessus, commencer à s'élargir.

Quant au remplissage de l'écluse, il n'a pas été non plus nécessaire de modifier le tube d'amont, auquel on aurait pu ne donner qu'un diamètre à peu près égal à celui de l'arête inférieure de son anneau reposant alternativement sur le caoutchouc. Il a suffi d'attacher à l'extrémité inférieure de ce tube un flotteur, composé de deux pièces de bois de section rectangulaire, de $0^m,70$ seulement de large pour pouvoir passer entre deux croisillons, et de $0^m,08$ d'épaisseur, ces deux flotteurs étant disposés en face l'un de l'autre et convenablement équilibrés. Leurs sommets étaient à un mètre au-dessus du niveau du bief inférieur. Ces pièces de bois

étaient enfoncées au-dessous du niveau de ce bief à une profondeur de 0m,30 afin qu'on pût au besoin varier leur hauteur.

On a d'abord fait baisser alternativement en temps utile le tube d'aval, qui se relevait d'ailleurs de lui-même en vertu de son contrepoids. La marche du tube d'amont a été entièrement automatique, ses levées différant peu de celles du tube d'aval pendant la vidange. Le rendement n'a pas été inférieur, dans ces conditions, à celui qu'on avait obtenu en faisant marcher le tube d'amont à la main, bien entendu pour un même état de vétusté de la machine et des portes d'aval de l'écluse. Il y a peut-être même eu un peu d'avantage à employer ainsi la marche automatique du tube d'amont, ce qui s'explique par la régularité des mouvements.

Mais la principale difficulté consistait à faire redescendre de lui-même le tube d'aval, pendant le remplissage. Dans l'état actuel des choses, on n'a pu l'obtenir pour les premières périodes qu'en le levant seulement à une hauteur de 0m,07; de sorte que le rendement ne pouvait pas être aussi fort que lorsqu'on le faisait baisser à la main. Il y aura quelques études à faire à l'époque du premier chômage du canal pour augmenter cette levée. Mais dès à présent elle suffit pour obtenir, pendant le remplissage, une épargne qui ne paraît pas différer de plus d'un cinquième environ de celle qu'on avait obtenue en faisant baisser le tube à la main pour une levée beaucoup plus grande. Avec celle de 0m,07 il suffisait de laisser revenir une partie de l'eau entrée dans l'écluse, pour le faire baisser vivement, en vertu de la succion résultant de l'écoulement du liquide. Il se produisait ensuite une oscillation en retour, c'est-à-dire pour ce cas remontante. Le flotteur du tube d'amont soulevait celui-ci, dont l'ascension se faisait très franchement, d'autant plus que, dans l'état actuel des choses, l'eau en y entrant pressait de plus en plus de bas en haut son anneau inférieur à mesure qu'elle y montait.

Quand chaque tube redescend, c'est en vertu d'une succion résultant d'une vitesse de l'eau qui doit différer, peu pour un même tube, à toutes les périodes, sauf les anomalies occasionnées notamment par le mauvais état de l'appareil. On conçoit cependant que, pour la dernière période du tube d'amont pendant le remplissage et du tube d'aval pendant la vidange, il y a un peu d'hésitation parce que, la différence des niveaux étant très diminuée, il faut, pour engendrer une même vitesse, dépenser beaucoup plus d'eau par un écoulement plus prolongé. Mais par une raison contraire, les dernières périodes de descente du tube d'aval se font plus franchement que les premières pendant le remplissage, puisque l'eau est montée de plus en plus dans l'écluse.

Supposons que la vitesse qui occasionne la descente du tube fût rigoureusement la même pour une période quelconque de remplissage. L'eau serait soutenue dans le tube d'aval, au-dessus du niveau du bief inférieur, à une hauteur qui serait sensiblement la même à l'instant où le tube commence à descendre. La force qui le ferait baisser étant alors supposée à peu près la même, pour une période quelconque, la descente du tube se ferait avec les mêmes vitesses et l'eau y monterait en vertu d'une même vitesse acquise, sauf la différence, provenant de ce que, pendant son ascension, elle serait poussée par une force d'autant plus grande qu'il y aurait plus d'eau dans le sas. On a pu observer, pendant le remplissage, qu'à l'instant où l'on entendait le tube d'aval toucher son siège, l'eau était d'autant plus haute dans ce tube que le niveau était plus élevé dans l'écluse. Cependant c'est peut-être surtout après l'instant où le tube d'aval touche son siège, que l'oscillation remontante a le temps nécessaire pour produire des vitesses de plus en plus grandes à mesure que l'eau monte dans le sas.

L'inertie des pièces solides mobiles et de l'eau soulevée par l'anneau extérieur étant une cause d'hésitation dans la levée du tube d'amont, la colonne liquide a le temps de parvenir

de plus en plus haut avant que ce tube se lève, et même quand il commence à se soulever, la force de succion, résultant du mouvement de l'eau, est une cause quelconque s'àjoutant à celles qui occasionnent de l'hésitation.

Il résulte de ces diverses considérations que, plus l'eau monte dans l'écluse, moins la partie des tubes que doit achever de remplir l'eau d'amont est considérable. De sorte que, tout en ne jouissant plus de l'avantage aussi complet des oscillations remontantes que pour une marche à la main, il y a cependant moins de perte de force vive provenant de cette cause particulière dans les dernières périodes que dans les premières.

On a fait à ce sujet quelques observations très provisoires et qu'on donne ici pour valoir ce que de raison. A la première oscillation remontante, quand le tube d'amont se lève, l'eau est à $0^m,70$ au-dessus du niveau d'aval. A la période suivante, elle est à $0^m,75$ et finit par être à $1^m,10$. La surface étant brisée, il avait été difficile de prendre ces mesures d'une manière exacte, mais il en résulte déjà une conséquence intéressante, venant à l'appui de ce que j'ai dit sur l'influence de la percussion de l'eau dans le mouvement de haut en bas pendant la vidange sur l'anneau du tube d'aval, tandis qu'il y a une percussion de bas en haut contre les flotteurs du tube d'amont pendant le remplissage pour les oscillations en retour. Il y avait lieu de penser, d'après cela, qu'il y aurait notablement plus de différence entre les hauteurs de la colonne dans le tube d'aval de la première période à la dernière, quand ce tube se lève pendant la vidange, qu'il n'y en a dans le tube d'amont entre la première et la dernière période de remplissage lorsque celui-ci se lève. C'est, en effet, ce qui a eu lieu.

La section de l'orifice annulaire resté libre par la levée de $0^m,07$ a seulement un peu moins d'un quart de la section de l'orifice circulaire, celui-ci étant rétréci par la plaque de fer qui porte le caoutchouc. Lorsque le tube d'aval se lève, la

vitesse dans le tuyau de conduite peut être considérée comme n'étant pas sans doute beaucoup au dessous de son maximum, car elle ne pourrait être en général augmentée que par l'action de l'eau qui reste encore dans les deux tubes et dont il s'agit d'abord de se rendre compte. Il faut que le vide, qui tend à se faire dans la conduite, soit rempli par cette eau ou par celle qui peut venir sous le tube d'aval. A partir de l'instant où celui-ci est soulevé, la colonne d'eau qu'il contient tend à se diviser en deux parties. L'une suit la colonne liquide en mouvement dans le tuyau de conduite, l'autre s'échappe sous ce tube et se perd en aval, mais la quantité, autant qu'on a pu l'observer, qui se perd ainsi, est très minime.

Quand la colonne liquide est descendue jusqu'à une certaine profondeur, l'eau du bief inférieur entre dans le système. Il faut même qu'elle y entre avant que cette colonne soit descendue jusqu'au niveau d'aval, à cause de l'aspiration résultant du mouvement de l'eau dans le tuyau de conduite. Pour s'en rendre compte, il faut remarquer que la pression latérale de la colonne verticale peut être diminuée à cause de sa vitesse ; de sorte que la pression de l'eau du bief inférieur peut se trouver plus forte que celle qui résulte de dedans en dehors de l'orifice annulaire, de ce que l'eau serait encore au-dessus du niveau du bief inférieur.

La surface de l'eau à l'intérieur du tube d'aval descend bientôt au-dessous du niveau de ce bief dans l'état actuel des choses. Elle descend même au-dessous du siège et dans l'espèce de tubulure formée de l'épaisseur du tuyau de conduite en maçonnerie. A la première période, elle arrive presque à la profondeur de l'arête supérieure de la colonne liquide du tuyau de conduite, sans cependant descendre assez bas pour que l'air pénètre dans ce dernier. Il s'agit maintenant de se rendre compte de la manière dont cette baisse, qui est d'ailleurs de moins en moins grande à mesure que les périodes s'éloignent de la première, et finit même par devenir peu sensible, contribue à diminuer le rendement, car il peut

sembler au premier aperçu que le déchet qui en résulte devrait être plus grand. En effet, l'eau relevée du bief d'aval dans l'écluse est puisée de plus bas qu'à l'époque où, baissant le tube d'aval à la main, on lui permettait de se lever assez haut pour entretenir l'eau du tuyau de conduite sans une dénivellation trop sensible en aval, sauf la baisse quelconque provenant nécessairement de l'affluence de l'eau ambiante, à cause de la disposition actuelle de la chambre du tube d'aval.

On remarquera d'abord qu'à l'époque où le niveau dans ce tube est au-dessous du siège, l'eau qui vient du bief inférieur forme une nappe qui doit avoir un peu d'inclinaison de haut en bas. Car si le fond, qui d'ailleurs est un peu en entonnoir, est ensuite horizontal près de l'orifice intérieur sur une largeur de $0^m,20$, sauf l'épaisseur du caoutchouc qui peut dépasser un peu la plaque de fer dans laquelle il est encastré, il y a une cause de contraction de veine liquide résultant de la disposition des parois du tube soulevé. Cette nappe ne détruit peut-être pas plus complètement sa force vive par sa convergence qu'une veine liquide dans un tuyau coudé à angle droit brusque. Ainsi une partie encore notable de sa force vive agit de haut en bas pour exercer une percussion sur la surface de l'eau qui est au-dessous d'elle ; et, de plus, la gravité imprime nécessairement à cette nappe convergente de la vitesse pendant qu'elle tombe sur cette surface. Celle-ci reçoit donc par ces deux causes un travail d'où il résulte que les choses se passent comme si le liquide n'était pas puisé d'aussi bas.

Aussi quand on a regardé par le sommet du tube d'amont la profondeur à laquelle l'eau descendait dans cette première période au-dessous du niveau d'aval, elle a paru, autant qu'on a pu l'observer, descendre seulement jusqu'au niveau du siège du tube d'aval, ce qui s'explique par l'effet de la percussion de la nappe liquide dont je viens de parler. Il y a donc lieu de penser que la baisse graduelle dans le tube d'a-

val où l'eau remonte ensuite jusqu'au niveau de la nappe extérieure, à mesure que la vitesse diminue dans le tuyau de conduite, peut être considérée pour la première période, quant à la cause de déchet qui en résulte, comme si elle ne dépassait pas à son maximum la profondeur du siège du tube d'aval au-dessous du niveau du bief inférieur. Il faut même sans doute tenir compte de ce qu'à partir de l'époque où ce siège est atteint par la colonne liquide, la nappe à mouvements concentriques dirigés un peu de haut en bas, agissant sur cette colonne, peut diminuer encore d'une manière sensible la cause de déchet qui vient d'être signalée. Aux périodes suivantes, l'eau descend d'autant moins qu'elles sont plus éloignées de la première. A la sixième, elle ne descend plus au-dessous du siège. Aux suivantes, elle reste de plus en plus au-dessus et aux dernières périodes la dénivellation dont il s'agit est très peu sensible.

Je ne parle de ces observations d'ailleurs provisoires que pour valoir ce que de raison. Mais il était intéressant d'indiquer des limites, afin de montrer qu'on peut se rendre compte, jusqu'à un certain point, des raisons pour lesquelles le déchet n'est pas plus augmenté qu'il ne l'est pour une si petite levée du tube d'aval. Il faut d'ailleurs tenir compte, pour les comparaisons entre le rendement de la marche automatique et celui de la marche à la main, de ce que pour celle-ci, quoique le tube d'aval puisse être levé beaucoup plus, la nappe liquide convergente, obligée de se détourner presque à angle droit pour entrer dans le système, donne lieu à une perte de force vive dont on peut même apprécier la limite.

On est encore obligé de baisser une première fois à la main le tube d'aval pendant le remplissage, parce que l'eau n'est pas encore assez haute dans l'écluse pour pouvoir, en redescendant, engendrer assez de vitesse, du moins sans qu'on perde trop de liquide relevé. Dans l'état où est l'appareil, on est d'ailleurs obligé d'avoir des périodes assez nombreuses de remplissage pour obtenir ainsi une marche régulière. On

n'a pu réduire ce nombre à moins de neuf. Quand on levait trop le tube d'amont pour diminuer ce nombre, l'eau descendait trop bas au-dessous du tube d'aval, et il en résultait dans le tuyau de conduite une introduction d'air qui, non seulement était une cause de perte de force vive et d'irrégularité, mais qui aurait sinon endommagé ce tuyau, du moins occasionné dans l'écluse des mouvements incommodes pour les bateaux. La levée du tube d'amont a été, par cette raison, réduite à environ 0m,13, ce qui était évidemment trop peu. Or, il est bien à remarquer qu'on avait obtenu une marche automatique de ce tube, avec une levée beaucoup plus grande, lorsqu'on baissait celui d'aval à la main (1).

L'expérience la plus intéressante à faire, la première fois qu'il y aura un chômage, consistera dans l'étude de la disposition de l'anneau inférieur du tube d'aval, la plus conve-

(1) Quand le tube d'amont redescend sur son siège, en étranglant graduellement la veine annulaire qui entre au-dessous de lui, il en résulte une diminution de pression et par conséquent une cause qui fait baisser la colonne d'eau à son intérieur. La détermination théorique de cette baisse serait très difficile. On ne sait pas assez positivement quelle est, dans le réservoir d'amont, l'étendue de la masse annulaire dont les sections sont plus ou moins comparables à l'orifice d'introduction sous le tube, pour pouvoir comparer à l'inertie de la colonne liquide, contenue dans celui-ci, l'inertie de la masse annulaire sur laquelle viennent s'exercer des pressions capables d'augmenter la vitesse pendant l'étranglement graduel.

On ne sait pas assez non plus combien il peut se perdre de force vive à la rencontre des filets liquides provenant de la convergence de l'écoulement, qui occasionne une flexion brusque vers le centre du tube, d'une manière analogue à ce que je viens d'indiquer pour le tube d'aval.

Il était difficile d'affirmer avant l'expérience que l'eau descendrait assez bas, à l'instant où le tube d'amont toucherait son siège, pour que celui d'aval se relevât de lui-même, en temps bien convenable. On avait donc fait l'expérience préliminaire suivante. A l'instant où l'on entendait le tube d'amont toucher son siège, pendant sa marche automatique pour les dernières périodes, telle qu'on l'obtenait avant la pose des diverses pièces de bois précitées, l'eau y était descendue à 1m,50 au-dessous du niveau du bief supérieur, la chute de l'écluse étant alors d'environ 2m,60.

nable pour permettre à ce tube d'avoir une plus grande levée pendant le remplissage.

Quand on débouche un orifice circulaire pratiqué dans un réservoir, la veine rencontrant le bouchon forme, autour de la face plane de ce dernier, une nappe annulaire dont l'angle, avec cette face, est d'autant plus grand que la hauteur de l'eau dans le réservoir est plus considérable. Il est bien entendu que, si l'orifice est vertical, on ne peut bien observer que les angles à droite et à gauche. Cela s'accorde avec quelques expériences préliminaires indiquées dans la première partie de cet ouvrage. D'après plusieurs observations faites à ce sujet, l'angle formé par une nappe liquide annulaire avec le plan parallèle à l'orifice avait un sinus à peu près égal au tiers du rayon. C'était d'après cela que j'avais déterminé provisoirement, pour mon appareil automoteur à tube oscillant, la forme de la collerette extérieurement relevée, appelée *parapluie renversé.*

Selon des expériences ultérieures, pour des hauteurs de réservoir notablement plus grandes, l'angle formé par cette nappe avec le plan dont il s'agit était à peu près la moitié d'un droit.

Quand on prend pour faire cette expérience un tube vertical d'environ 2 mètres de haut, bouché à son extrémité inférieure, et sur lequel on a percé latéralement un orifice circulaire; si l'on débouche subitement cet orifice, le tube étant plein d'eau, le bouchon en bois étant tenu assez près de l'orifice, l'angle de la nappe liquide autour de ce bouchon varie de plus en plus, dans le sens que je viens d'indiquer, à mesure que le tube se vide.

J'ai déjà fait remarquer, page 339, qu'il y avait des conditions au moyen desquelles on pouvait relever notablement les bords du *parapluie renversé* sans qu'ils cessassent d'être rejoints par la nappe liquide annulaire.

L'étude qui reste à faire consiste surtout à déterminer l'angle qu'il pourra être convenable de donner à cette pièce,

de manière à exercer une assez forte succion de haut en bas, quand le tube d'aval sera soulevé beaucoup plus qu'il ne l'est dans l'état actuel des choses pendant le remplissage de l'écluse.

Il paraît qu'on n'a pas généralement saisi ce qu'il y a de plus intéressant dans les phénomènes de succion que j'ai signalés, où l'on trouve une application nouvelle de la force centrifuge sous le *parapluie renversé*. On conçoit que si ses bords sont assez relevés, de manière que les forces dont il s'agit puissent être utilisées convenablement, il y a lieu d'espérer que les autres forces de succion, qui tendent à faire retomber le tube aux époques où il doit rester levé, pourront être atténuées précisément par cette disposition.

Quand le tube se lève, en laissant retomber au bief d'aval de l'eau qu'il contient, la nappe liquide résultant de cet écoulement *s'écrase* principalement à la partie inférieure de l'orifice resté libre par sa levée.

Par conséquent, plus le *parapluie renversé* sera relevé, moins il sera sollicité par une force de succion tendant à le ramener sur son siège à l'époque où l'on veut qu'il se lève assez franchement. Lorsque l'eau du bief d'aval entrera au-dessous de lui, on conçoit que plus les bords du *parapluie renversé* seront relevés, moins la force de succion qui tend à le ramener sur son siège sera considérable, dépendant surtout d'un principe connu de D. Bernoulli sur la diminution de pression provenant de ce que le liquide est en mouvement. Quand l'eau sortira de l'écluse et qu'il s'agira de faire redescendre le tube d'aval, la nappe liquide s'écoulera principalement par la partie de l'orifice annulaire qui est le plus près du *parapluie renversé*. La vitesse pour un même débit, dans un temps donné, sera donc beaucoup plus grande dans cette partie que celle qui aura lieu en sens contraire, quand l'eau rentrera du bief d'aval dans l'écluse, à une époque où il est convenable que la force de succion, provenant de cette rentrée, ne fasse pas descendre le tube d'aval. Les choses parais-

sent donc disposées d'une manière convenable dans les conditions résultant de cette forme du *parapluie renversé*, à cause de la manière dont pourra s'exercer une force de succion dépendant de la communication latérale du mouvement de l'eau.

Quel que puisse être le résultat des expériences qui seront faites sur la meilleure disposition de l'anneau du tube d'aval, il est intéressant d'approfondir l'étude du mode actuel de l'introduction de l'eau du bief inférieur sous ce tube, parce qu'on pourrait sans doute le lever plus haut en augmentant la profondeur de son siège, même sans rien changer à l'anneau dont il s'agit. Cette étude aura d'ailleurs l'avantage de mieux fixer les idées sur la manière dont s'exercent les divers effets de succion et d'éviter à ce sujet des malentendus.

Quand l'eau entre du bief supérieur sous le tube d'amont, ce dernier ayant un anneau extérieur, il y a une diminution de pression provenant, comme on sait, de la vitesse de l'eau, et il en résulte une cause pour faire descendre ce tube. Le cas n'est pas le même pour le tube d'aval, quand l'eau rentre du bief inférieur dans le tuyau de conduite, parce que l'anneau de ce tube est à l'intérieur de celui-ci.

Pour bien se rendre compte de ces divers effets, je suppose que deux réservoirs remplis d'eau soient disposés de manière que le niveau de l'un, étant au-dessus de celui de l'autre, l'eau du premier s'écoule dans le second par un tuyau de conduite. On sait que la pression sera diminuée dans celui-ci en vertu de la vitesse. Mais il restera toujours une pression plus grande que celle qui serait exprimée par la hauteur du niveau du bief inférieur, selon un théorème de D. Bernoulli.

On conçoit d'après cela que s'il y a un écoulement de ce bief dans le tuyau de conduite, à l'époque où il n'y aura plus d'eau dans le tube d'aval, il restera sous celui-ci une partie quelconque de la pression du bief inférieur. De sorte qu'il tendra plutôt à être soulevé qu'à descendre, sauf les effets se rapprochant plus ou moins de ceux des ajutages résultant

de la forme actuelle de son anneau précité. Quand celui-ci sera recouvert, comme la rentrée de l'eau du bief d'aval proviendra de ce qu'à l'extérieur les pressions seront plus grandes qu'à l'intérieur, on se retrouvera encore plus ou moins dans des conditions analogues à celles des deux réservoirs superposés dont je viens de parler, jusqu'à ce que l'eau soit remontée à la hauteur du niveau d'aval.

A l'époque où ce tube devra redescendre, l'eau montera à son intérieur à une hauteur quelconque au-dessus de ce niveau. Le cas sera alors très différent, parce que le liquide pressera de haut en bas l'anneau intérieur. De sorte qu'en supposant même qu'il n'y eût pas à considérer de force centrifuge, ni d'autres raisons quelconques aidant à la descente du tube, celle-ci aurait une cause provenant de la diminution de pression occasionnée par la vitesse de l'eau sous l'anneau dont il s'agit. Il résulte de ces considérations que la hauteur de l'eau, dans le tube d'aval au-dessus du niveau du bief inférieur, n'a pas besoin d'être à beaucoup près aussi grande que la hauteur du niveau de ce bief au-dessus du siège de ce tube, pour que celui-ci puisse commencer à descendre, quoiqu'il soit resté levé quand l'eau coulait au-dessous de lui, à l'époque même où le niveau de l'eau dans le tube était descendu au-dessous de ce siège.

Cela s'accorde avec les faits observés. Quand on regardait par le sommet du tube, à l'instant où celui-ci commençait à descendre pendant le remplissage, l'eau n'y était encore montée, au-dessus du niveau du bief d'aval, qu'à une hauteur assez petite par rapport à celle de ce niveau au-dessus du siège. Il est d'ailleurs bien entendu qu'elle y montait ensuite très rapidement.

Lorsqu'on a voulu, dans l'état actuel des choses, diminuer le nombre des périodes de remplissage, comme on l'avait pu en baissant le tube d'aval à la main, on introduisait, ainsi que je l'ai expliqué, de l'air dans le tuyau de conduite. Mais si le siège avait été beaucoup plus bas, pour une même levée

du tube, il serait entré beaucoup plus d'eau quand la colonne liquide à l'intérieur serait descendue à une certaine profondeur. Il serait donc sans doute arrivé assez d'eau pour combler le vide, sans qu'on eût eu à craindre cette introduction d'air, lorsqu'à chaque période on aurait laissé entrer plus d'eau sous le tube d'amont.

Si, à chaque période, le procédé dont je viens de parler permettait d'introduire plus d'eau du bief supérieur, on ferait rentrer une plus grande quantité de liquide dans le sas. Or, une même fraction de la quantité d'eau relevée, retombant au bief inférieur, suffirait alors pour faire redescendre le tube dans le cas où la levée de celui-ci serait augmentée dans des proportions convenables par rapport à ces conditions. Il en résulterait donc que l'eau d'aval pourrait même rentrer par un plus grand orifice et que les inconvénients occasionnés par la trop petite levée de ce tube pourraient être notablement atténués. L'augmentation de cet orifice serait elle-même une raison pour permettre d'introduire plus d'eau à chaque période par le tube d'amont, de sorte que les inconvénients dont il s'agit seraient encore moindres.

Si l'on ne craignait pas les engorgements pouvant provenir des herbes ou d'autres corps étrangers, ce qu'il y aurait peut-être de plus convenable à divers points de vue, pour introduire alternativement dans le tuyau de conduite de l'eau d'aval pendant le remplissage, serait une sorte de clapet de bélier aspirateur, comme je l'ai dit page 552, où à la ligne 14 il faut lire d'*aval* au lieu de d'*amont*. Ajoutons ici que ce clapet serait au-dessous du siège du tube d'aval, qui resterait levé pendant toute la durée du remplissage de l'écluse. Cette position aurait l'avantage de permettre de contribuer à garder l'eau, s'il y avait quelque défaut dans le joint alternatif du tube mobile avec son siège. Des expériences faites sur un modèle, voir pages 473 et suivantes, où j'ai d'ailleurs signalé les inconvénients qui peuvent en résulter, ont montré qu'un clapet de ce genre fonctionnait bien dans des conditions

analogues. sans que sa charnière fût à une de ses extrémités. Il suffisait qu'elle ne fût pas tout à fait à son centre de figure; il serait tenu levé pendant tout le temps de la vidange du sas.

Quant au tube d'amont, pendant la vidange on pourrait aussi disposer au-dessous de son siège un clapet du même genre, mais pouvant s'ouvrir de dedans en dehors : il serait tenu levé pendant tout le temps du remplissage. Au lieu de se verser par le sommet des tubes, l'eau relevée rentrerait au bief d'amont par le clapet dont il s'agit. Cela aurait l'avantage de ne pas faire relever l'eau au-dessus du niveau du bief supérieur. Non seulement on pourrait épargner ainsi du travail, mais le niveau de ce bief pourrait avoir de grandes variations, sans qu'on fût obligé pour cela de faire verser l'eau plus haut que cela ne serait nécessaire quand le niveau serait très bas. Le tube d'aval serait alors prolongé assez notablement au-dessus du maximum de hauteur de ce niveau pour que l'eau ne se versât jamais à son sommet.

Les tubes mobiles ont l'avantage de permettre de ne pas se préoccuper autant des herbes, etc. Cependant, il me paraît intéressant de conserver la trace du procédé dont je viens de parler. Si, dans la pratique, l'emploi de ces clapets n'était pas trop gênant, cela permettrait d'activer la manœuvre, parce qu'on n'aurait plus à remplir et à vider alternativement qu'un seul des deux tubes pour chaque opération de remplissage ou de vidange. Les chemins parcourus par des résistances passives seraient diminués, et il y aurait lieu de voir si ces divers avantages ne compenseraient pas les inconvénients pouvant résulter de ces clapets et dont une partie peut d'ailleurs être bien atténuée au moyen des nouveaux freins hydrauliques convenablement disposés.

Mais les tubes mobiles sont d'une telle simplicité, en permettant d'ailleurs de verser l'eau relevée par leurs deux sommets, que je me borne pour le moment à en recommander l'usage. Quant à leur marche automatique, il n'en résulte pas, même dans les conditions où elle a déjà été obtenue,

une durée plus longue, pour chaque opération de remplissage ou de vidange, que lorsque, dans des conditions analogues, on les fait marcher à la main.

Il est bien entendu que les pièces de bois doivent être convenablement équilibrées. Quant à celles du tube d'amont, lorsque l'écluse est au niveau du bief inférieur, elles aident par leurs poids ce tube à s'appuyer sur son siège. Il faut, si l'on emploie ces pièces de bois, en général, qu'elles soient distribuées autour de la paroi en formant un cylindre annulaire.

La marche automatique permettant de ne lever chaque tube qu'une seule fois pour chaque opération, il n'est pas indispensable, dans le cas où cela serait gênant, d'avoir des balanciers aussi longs parce qu'on aurait des moyens connus de lever une première fois chaque tube. Mais, dans l'état actuel des choses, les cordes des balanciers étant assez longues, il vaudrait mieux y substituer des chaînes, parce que les alternatives d'humidité et de sécheresse changent assez la longueur des cordes pour gêner la marche automatique en diminuant ou augmentant la course des contrepoids. Ceux-ci sont étagés par les raisons ci-dessus indiquées.

Il reste à examiner l'application du système aux écluses accolées dont j'ai déjà parlé pages 407 à 412. La principale difficulté paraît consister en ce que, si les réservoirs ont de trop grandes hauteurs, on a beaucoup de peine à les tenir étanches. Mais il y a une circonstance où l'on peut la tourner d'une manière très simple quand il n'y a que deux écluses accolées. Il suffit, en effet, de n'avoir à considérer que la hauteur des murs de chacune d'elles. Or, du moins pour le cas des écluses *jumelles*, on pourrait à la rigueur se contenter des appareils relevant une partie de l'eau au bief supérieur, parce que, dans bien des cas, on aurait à remplir le sas inférieur d'une des écluses pendant qu'on viderait le sas supérieur de l'autre. Les tubes mobiles pourraient être disposés dans une rigole de décharge comprise entre les deux sas infé-

rieurs. Ils seraient près du mur de chute qui sépare deux sas accolés. La communication pourrait être alternativement établie, au moyen de petites portes de flot, dans une chambre disposée autour de ces tubes, soit avec le bief inférieur, quand les écluses devraient fonctionner indépendamment l'une de l'autre, soit avec celui des sas inférieurs qui devra se remplir quand un des sas supérieurs devra se vider.

Les grands tubes mobiles construits à l'écluse de l'Aubois n'ont pas seulement pour but d'épargner de l'eau, mais aussi, comme M. Vallès l'a d'ailleurs dit dans son rapport (voir ci-dessus, p. 558), de permettre de démasquer, sans effort et instantanément, de très larges orifices pour accélérer la navigation. J'ai depuis longtemps, notamment en 1844, signalé cette propriété. Les vannes cylindriques étaient déjà appliquées aux turbines, mais on n'avait pas remarqué qu'elles avaient la propriété de ne donner lieu à aucun coup de bélier dans les aqueducs, les sections transversales n'étant jamais bouchées. J'avais signalé ces tubes mobiles, quant à leur application aux colonnes liquides oscillantes, dans un mémoire présenté à l'Académie des Sciences en 1837.

En 1845, M. le général Poncelet a cité dans un rapport à l'Institut cette disposition, en rappelant que c'était moi qui l'avait indiquée, et l'honorant ainsi de son suffrage. D'après une lettre que je reçois du Ministère des Travaux Publics, ce système est aujourd'hui *préconisé par la plupart des ingénieurs chargés de grands services de navigation*, qui se sont fait autoriser à en établir sur les nouvelles voies navigables. Je peux d'ailleurs annoncer que le gouvernement hollandais, après avoir envoyé un de ses ingénieurs à l'appareil de l'Aubois, fait construire ces tubes sur mon indication, pour accélérer le service à une de ses écluses.

Expériences sur l'appareil automoteur élévatoire à tube oscillant appliqué sur une chute motrice de 3 mètres.

Je n'avais pas eu encore l'occasion d'élever de l'eau à une hauteur de 5 à 6 mètres au-dessus du niveau du bief d'amont, au moyen d'une chute motrice de 3 mètres. Dans la localité où l'expérience a été faite, je ne pouvais pas employer un uyau de conduite d'un diamètre suffisant pour obtenir le maximum de rendement, parce que je n'avais à ma disposition qu'une petite quantité d'eau, et qu'il était intéressant, pour un exemple d'application, de pouvoir marcher assez longtemps. La disposition des lieux ne permettait pas d'ailleurs de donner au tuyau de conduite une longueur de plus de 18 mètres. Son diamètre intérieur n'est que de $0^m,20$. On l'avait d'abord fait entièrement en poterie, mais à cause des sources qu'on a trouvées en le posant, il y a eu un tassement qui en a endommagé une certaine longueur qu'on a remplacé par un tuyau de fonte. Comme on peut se contenter de ce qu'on appelle des tuyaux de *descente* usités pour les goutières, je conseille, dans des circonstances semblables, de les préférer à la poterie, qui, en supposant qu'on en fût aussi sûr, coûte plus cher en définitive, à cause de la maçonnerie au moyen de laquelle on est obligé d'en consolider au moins une certaine partie, surtout dans les mauvais terrains.

Le système employé est celui qui est décrit pages 781 à 856. C'est d'ailleurs le même principe que celui dont on se sert pour la vidange de l'écluse de l'Aubois, sauf quelques différences de construction dans les conditions spéciales à remplir. J'ai dit, p. 850, qu'on pouvait ne rendre mobile qu'une petite partie du tube oscillant, en employant une vanne cylindrique ou une soupape de Cornwall. J'avais oublié, comme on peut le voir dans l'extrait de la séance de la

Société philomathique du 24 janvier 1857, publié dans le journal *l'Institut*, que j'avais proposé de joindre le sommet d'un tube mobile à un tube d'ascension fixe, au moyen d'un manchon flexible disposé à l'intérieur de celui-ci et s'ap puyant alternativement contre sa paroi intérieure quand il est descendu sur son siège. Je remarquais dans cette note que cette disposition avait l'avantage de ne pas occasionner de plis trop prononcés, de nature à déchirer le manchon avant un assez long usage. C'est cette disposition, pour laquelle j'avais d'abord proposé du caoutchouc, qui a été exécutée dans l'application dont il s'agit, au moyen d'un cuir flexible de veau. L'appareil a marché très régulièrement. Un long usage. sera nécessaire sans doute pour s'assurer de la durée de ce manchon. On a d'ailleurs employé avec succès, pendant plusieurs années, un manchon analogue pour un autre appareil décrit page 685.

Il est à remarquer que le cuir, s'appuyant contre les parois quand le tube mobile est descendu, n'a point à supporter en général de pressions capables de le déchirer, quoiqu'elles puissent être très grandes, étant soutenu par ces parois. Il n'y a à se préoccuper sous ce rapport que de l'extrémité inférieure du cuir, à son point d'attache avec le tube mobile. Le tube d'ascension étant fixe, on lui a donné une section d'un décimètre carré, tandis que, s'il avait été mobile, il aurait fallu, pour ne pas le laisser soulever, rétrécir sa section au moyen d'une pièce fixe posée à son intérieur, ce qui aurait augmenté les frottements.

Depuis que la première partie est imprimée, on a fait sous ma direction, dans l'arsenal du port de Cherbourg, des expériences qui confirment qu'on ne doit présenter qu'avec toute la réserve possible, comme je l'ai dit dans le texte, page 291, des considérations émises page 288. On a disposé à l'extrémité d'un canal factice, terminé par des planches verticales simulant des digues convergentes, un réservoir décrit page 904. Or, quand le fond était plus bas que celui du canal, seulement de $0^m,005$, pour une profondeur d'eau de $0^m,355$

dans celui-ci, cela changeait notablement les effets des vagues sur la manière dont le sable, répandu à l'entrée de ce réservoir, pouvait, ou former des saillies, ou être balayé. Il ne faudrait donc pas appliquer, sans tenir compte de ces phénomènes encore trop peu connus, les résultats obtenus au moyen d'un cours d'eau pénétrant dans un réservoir, à ceux d'une sorte de courant, tel qu'il peut être formé par les coups de bélier des vagues dans le cas dont je viens de parler, les effets qui proviennent de la nature du mouvement pouvant changer notablement l'état de la question. Il n'est cependant pas sans intérêt de signaler des observations pouvant avoir une certaine analogie avec celles qui seront faites ultérieurement sur le mode précité de l'action des vagues. Cette note a seulement pour objet d'éviter tout malentendu.

ERRATA DE LA SECONDE PARTIE

Page 437, ligne 24, après le mot court, ajouter ayant en général un point plus faible que les autres. P. 578, au lieu de tiraude, lisez tirande.

Page 438, à la fin de la ligne 5, ajouter ou.

Page 519, à la fin de la ligne 5, ajouter moins.

Page 552, ligne 14, au lieu de d'amont, lisez d'aval.

Page 569, ligne 30, au lieu de plandhe, lisez planche.

Page 599, ligne 3, au lieu de basin, lisez bassin.

Page 602, ligne 14, au lieu de sur, lisez à.

Page 603, ligne 4, après le mot que, ajouter de.

Page 720, ligne 5, au lieu de Witehurst, lisez Whitehurst.

Page 803, ligne 11, au lieu de organcs, lisez organes.

Page 807, ligne 10, au lieu de tangage, lisez roulis.

Page 807, ligne 14, au lieu de atumescence, lisez intumescence.

SUPPLÉMENT AUX ERRATA DE LA PREMIÈRE PARTIE.

Page IV. . . . . . . au lieu de 397, lisez 379.

Page V, avertissement de la première partie.

Page 105, ligne 20, au lieu de droit, lisez doit.

Page 121, ligne 22, après le mot long, ajouter vertical, mouillé, et d'abord rempli d'eau en repos sur une longueur de $0^m,30$.

Page 121, ligne 31, au lieu de $0^m,16$, lisez $0^m,20$ environ.

Page 221, ligne 19, au lieu de *de*, lisez *du*.

Page 269, ligne 7, effacer le mot *Y*.

Page 277, ligne 2, au lieu de *lames*, lisez *houles*.

Page 313, ligne dernière au lieu de résuliat, lisez résultat.

Page 343, ligne 22, au lieu de par, lisez pas.

Avis au relieur. — Les cinq premières planches doivent être mises à la fin de la première partie et les trois dernières à la fin de la seconde.

TABLE DES MATIÈRES

DE LA

SECONDE PARTIE.

Versailles. — Imp. E. Aubert.